

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоефективності

Кафедра автоматизації управління електротехнічними комплексами

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Віктор Розен

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-науковою програмою «Інжиніринг автоматизованих
електротехнічних комплексів»**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

**на тему: «КВАЗІОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ПОЗИЦІОНУВАННЯ
«ЛЕТЮЧОЇ» ПИЛИ»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ОА-81

Набок Степан Сергійович _____

Керівник:

к.т.н., доц. Торопов Антон Валерійович _____

Консультант з стартап-проекту

к.т.н., доцент, Шевчук Н.А. _____

Рецензент:

Старший викладач кафедри

Теплотехніки та енергозбереження,

Оборонов Тарас Юрійович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут енергозбереження та енергоефективності

Кафедра автоматизації управління електротехнічними комплексами

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-наукова програма «Інжиніринг автоматизованих електротехнічних комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віктор Розен

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Набок у Степану Сергійовичу

1. Тема дисертації «Квазіоптимальне управління електромеханічною системою позиціонування «Летючої» пили», науковий керівник дисертації Торопов Антон Валерійович, к.т.н., доц., затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: електромеханічна система переміщення «летючої» пили.
4. Предмет дослідження: квазіоптимальне управління електромеханічною системою «летючої» пили.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
 - Здійснити аналітичний огляд існуючих систем розкрою прокатного стану та визначити фактори, що найбільше впливають на точність позиціонування.
 - Розробити уточнену математичну модель системи регулювання електроприводу переміщення механізму каретки «летючої» пили.
 - Здійснити процедура синтезу оптимального регулятора з урахуванням нелінійностей в контурі регулювання переміщення «летючої» пили одним із відомих методів.

- Видати рекомендації щодо практичної реалізації розробленої системи керування переміщення на базі сучасної мікропроцесорної техніки.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій: публікація у матеріалах II науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрозробит

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	.к.т.н., доц., Шевчук Н.А.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналітичний огляд електромеханічних систем «летючих» пил	31.10.2019	виконано
2	Аналітичний огляд систем керування систем електроприводу з керуванням положення	31.12.2019	виконано
3	Розробка математичної моделі електроприводу «летючої» пили	01.03.2020	виконано
4	Розробка оптимального регулятора для електроприводу «летючої» пили	01.04.2020	виконано
5	Дослідження системи електроприводу із синтезованим регулятором методом цифрового моделювання	01.05.2020	виконано
6	Розробка стартап – проекту	14.05.202	виконано

Студент

Степан Набок

Науковий керівник

Антон Торопов

Вступ

В теперішній час все більш актуальною стає задача підвищення продуктивності промислового обладнання. Також однією з пріоритетних завдань автоматизації є максимально можливе зниження механічного зносу обладнання, особливо це питання актуальне в системах з високою динамікою і великими інерційними масами механізмів. Одним з напрямів, де ці задачі є найбільш актуальними — це відріз «на льоту» без зупинки вихідного матеріалу без зниження точності різку. Такі механізми використовуються для поділу на мірні довжини заготовки на машинах безперервного лиття заготовок, поділу на мірні довжини труби на трубоелектрозварювальних агрегатах (ТЕСА) і в інших подібних випадках.

Технологічні завдання крою прокату наступні:

- забезпечення отримання широкого діапазону відрізуваних довжин;
- поліпшення якості різку і точності відрізуваних довжин;
- розширення сортаменту профілів, що якісно розрізаються);
- забезпечення відповідності різко технологічним вимогам;
- підвищення швидкості, продуктивності та надійності.

Виробництво вимагає все більшої кількості попиту виготовленого матеріалу, тому потребує все більшого безперервного ряду відрізуваних довжин із заданою точністю на максимальних швидкостях. Наприклад, подача мірних довжин в термостати або нагрівальні колодязі без теплових втрат, що особливо важливо для якісних сталей. Ця система запрошує виключити або істотно спростити лінії обробки, в результаті для чого зменшуються капіталовкладення, виробничі площі і кількість робочого персоналу, а також розширюються можливості виконання замовлень.

Прикладом такої системи є пристрій «летюча пила». «Летюча пила» — механізм, який призначений для розрізання поперечним перерізом на ходу рухомого прокату таких перетинів, порізка яких за допомогою летючих ножиць не може бути реалізована. Як правило, електропривод «летючої пили» працює під управлінням системи мірного різання, забезпечуючи необхідну точність порізки матеріалу.

Нижче викладені основні принципи побудови системи управління електроприводами летючої пили ТЕСА в режимі мірного різання матеріалу. Описані рішення були випробувані і можуть бути використані при створенні або модернізації аналогічних електромеханічних систем. Слід зазначити, що в останні роки в технічній літературі питань комплексного дослідження автоматизованого електроприводу і системи управління мірним різом летючої пили приділяється мало уваги. Тематика опублікованих в останні роки робіт присвячена, як правило, приватним проблемам цього електромеханічного комплексу.

Актуальність проблеми.

На сьогодні у світі все більшою стає необхідність у виготовленні продукції, що виробляється з допомогою електромеханічних систем мірного різання. Виробники ж у свою чергу запитують більшої точності різку, надійності та ремонтпридатності, зменшення браку продукції та економічності. Для «летючої» пили, що забезпечує відріз металевих труб, похибка відпрацювання положення не повинна перевищувати 0,5мм при змінному завданні за положенням. При цьому завдання за положенням змінюється зі швидкістю вище 1м/с внаслідок необхідності жорсткої синхронізації переміщення труби та «летючої» пили під час різку. Використання стандартного ПП — регулятора положення при великих швидкостях різку є неможливим, оскільки зміна завдання за положенням є

лінійною функцією, та при використанні ПП – регулятора в системі не буде забезпечуватися нульова статична похибка за вихідною координатою.

Метою роботи є підвищення точності різку металевих труб шляхом використання системи квазіоптимального позиціонування «летючої» пили при наявності нелінійної зміни сигналу завдання.

Завдання.

- Здійснити аналітичний огляд існуючих систем розкрою прокатного стану та визначити фактори, що найбільше впливають на точність позиціонування.

- Розробити уточнену математичну модель системи регулювання електроприводу переміщення механізму каретки «летючої» пили.

- Здійснити процедура синтезу оптимального регулятора з урахуванням нелінійностей в контурі регулювання переміщення «летючої» пили одним із відомих методів.

- Видати рекомендації щодо практичної реалізації розробленої системи керування переміщення на базі сучасної мікропроцесорної техніки.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система переміщення «летючої» пили.

Предметом дослідження є квазіоптимальне управління електромеханічною системою «летючої» пили.

Наукова новизна.

Вперше розроблений алгоритм квазіоптимального управління електромеханічною системою крою металевих труб з «летючою» пилою з урахуванням «люфту» в механізмі переміщення та обмеження на керування.

Практичне значення.

Розроблена система керування може застосовуватись в системі крою прокатного стану, наприклад на виробництві металевих труб або труб з іншого матеріалу, на деревообробці, на виробництві металевого або пластикового профілю при наявності суттєвих люфтів в механіці виконавчого механізму.

Публікації.

Набок С.С. Квазіоптимальне керування температурою припливного повітря з варіаціями сталої часу технологічного процесу. / Набок С.С.// Матеріали науково-технічної конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ» «Енергія. Екологія. Людина» (Київ, 2020р.) / К. : НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2020. – с.

Апробація наукових результатів.

Розроблені результати доповідались на науково-технічній конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ» «Енергія. Екологія. Людина» (Київ, 2020р.)

Структура і об'єм роботи.

У першій частині проведено аналіз сучасних систем керування електромеханічних механізмів переміщення, розглянуто переваги і недоліки існуючих алгоритмів керування та їх практичних реалізацій.

Також здійснено аналітичний огляд існуючих електромеханічних систем позиціонування з використанням складних регуляторів положення, що забезпечують оптимальний або близький до оптимального характер перехідних процесів.

У другій частині магістерської дисертації була розроблена уточнена математична модель контуру позиціонування з врахуванням насичень та «люфтів» в електромеханічній частині. Також були визначені параметри для цієї моделі, вибрана схема практичної реалізації регулятора. В цій же частині був здійснений синтез близького до оптимального регулятора, що забезпечує мінімум динамічної помилки при керуванні. Був отриманий алгоритм керування та запропоновані основи його програмної реалізації.

В третьому розділі проведено дослідження статичних та динамічних характеристик системи методом цифрового моделювання з використанням програмного забезпечення MATLAB та його додатку Simulink. Виконані рекомендації щодо налагодження регулятора положення на базі програмованого логічного контролера, згідно з отриманими результатами синтезу і моделювання.

В розділі стартапу проведений аналіз ринку для аналогічних систем керування та наведені рекомендації для виводу цієї продукції у виробництво.

Розділ 1. Аналітичний огляд існуючих систем розкрою прокатного стану та аналіз сучасних систем керування електромеханічних механізмів переміщення

1.1. Огляд існуючих систем розкрою прокатного стану.

1.1.1. Конструкція електромеханічної установки «летюча пила».

Електромеханічний комплекс механізмів летючої пили ТЕСА розділяє на частини заданої довжини одержувану на агрегаті рухому трубу. Відомі різні конструкції такого комплексу, включають електричні, гідравлічні і пневматичні приводи.

Розглядається конкретний випадок, коли до складу електромеханічного комплексу летючої пили ТЕСА входять чотири основних механізми: пересування каретки; обертання пилкового диска; переміщення пилкового диска; зчіпки каретки, яка рухається, з трубою. Останні три механізми встановлені на каретці. Каретка приводиться в рух регульованим електродвигуном через циліндричний редуктор і рейкову зубчасту передачу, обертання пилкового диска проводиться нерегульованим асинхронним електродвигуном, а механізми переміщення пилкового диска і зчіпки оснащені електрогідравлічними приводами.

Функціональну схему системи представлено на рисунку 1, де:

1 — каретка;

2 — зчіпка, жорстко приєднана до каретки;

3 — електропривод переміщення каретки;

4 — ланцюгова передача;

5 — рухомий прокат (металева труба);

6 — електропривод пилкового диска.

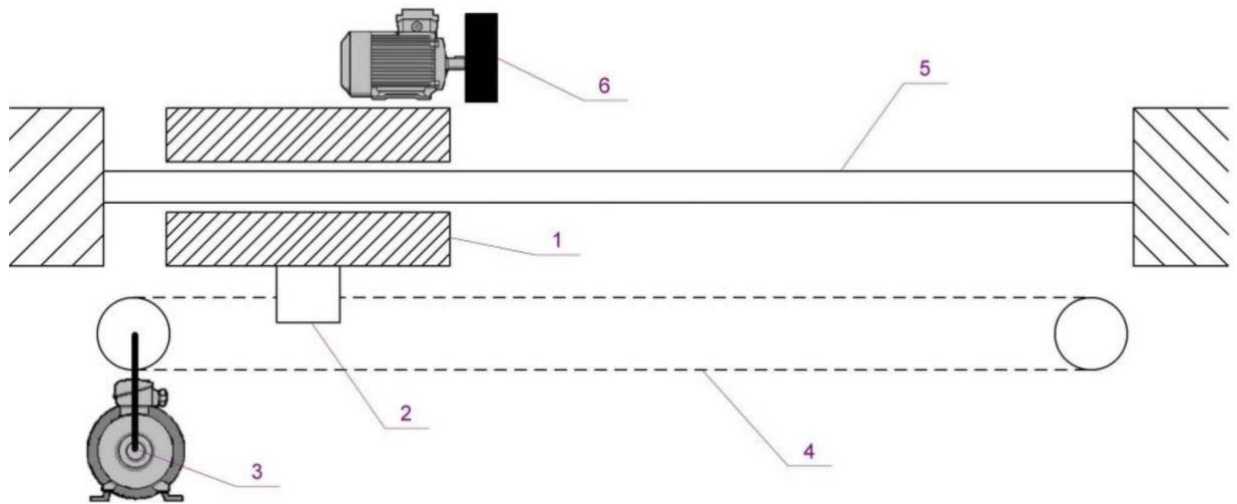


Рисунок 1. Функціональна схема системи «летюча пила».

1.1.2. Технологічний процес.

Електропривод обертання пилкового диска працює в тривалому режимі, а робота інших механізмів летючої пили відбувається циклічно.

Загальний час циклу роботи складається з наступних відрізків:

- стоянка каретки, механізмів зчеплення і переміщення пилкового диска у вихідних положеннях в проміжку між різаними (пауза);
- розгін каретки до швидкості руху труби;
- з'єднання каретки з трубою за допомогою механізму зчеплення;

- різ труби переміщенням пилкового диска при спільному русі зчеплених труби і каретки;
- розчеплення труби і каретки після закінчення різу;
- гальмування і зупинка каретки;
- повернення каретки в початкове положення.

З точки зору управління, автоматизовану електромеханічну систему летючої пили слід віднести до систем підвищеної складності, вона призначена для циклічного рішення двох основних задач: управління параметрами електродвигуна каретки (струм, момент, швидкість обертання) і управління траєкторій руху каретки, як робочого органу. Якщо перша з цих завдань може бути успішно вирішена за допомогою стандартних засобів управління сучасного автоматизованого електроприводу з цифровим мікропроцесорним управлінням, то для якісного вирішення другого завдання потрібне використання допоміжних засобів програмованої обчислювальної техніки.

Сучасний регульований електропривод змінного струму каретки виконується за системою ПЧ-АД або ПЧ-СД. З огляду на вимоги до динаміки цього електроприводу доцільно застосувати електродвигун з високими динамічними показниками. Такими властивостями володіють, наприклад, електродвигуни нової серії MCS фірми Lenze, ці електродвигуни орієнтовані на застосування в системах частотного електроприводу з живленням від перетворювачів частоти з цифровим мікропроцесорним управлінням серії 8400 Vector Topline фірми Lenze.

Електродвигун каретки оснащується імпульсним датчиком швидкості, векторна система автоматичного регулювання швидкості — цифрова мікропроцесорна. Для побудови програмованої автоматизованої системи мірного різання використовуються обчислювальні можливості

програмованого контролера, в якості якого може бути використаний, наприклад, контролер серії lenze L-force 3200c,.

Необхідний датчик швидкості руху труби, наприклад, фотоімпульсний датчик швидкості (енкодер) із інтерфейсом CAN та підтримкою протоколу CANopen, встановлений на ролику, він приводиться в обертання рухом труби.

1.2. Аналітичний огляд існуючих систем розкрою прокату

До ресурсозберігаючих технологій прокатного виробництва можна віднести:

- економічну технологію розкрою;
- збільшення виходу придатного мірного прокату;
- зниження браку в результаті зменшення "бурежек" між групами клітей прокатних станів;
- зменшення відходів завдяки обрізку мінімальної довжини заохолоджених кінців розкатів;
- отримання необхідної якості торців прокату при різанні і розширення сортаменту профілів, які якісно розрізаються за допомогою ножів досконалих конструкцій;
- зменшення споживання електроенергії летючими ножицями і пилами за рахунок застосування режиму запуску на різ замість режиму безперервного рівномірного обертання і використання удосконалених типів ножиць зі зменшеними моментами інерції виконавчих механізмів.

Кожна з перерахованих складових вносить свій внесок в загальну частку відходів при виробництві прокату. Відомі роботи, присвячені вирішенню проблеми збільшення виходу придатного сортового і листового прокату. Проте в більшості робіт наводяться тільки методики і рекомендації, причому без взаємозв'язку з машинами, що реалізують прогресивні технологічні процеси.

Поліпшення якості продукції та розвитку прокатного виробництва багато в чому може сприяти використанню створеного в 1970 - 2000 рр. виробничого і науково-технічного потенціалу в області розробки високопродуктивних летючих ножиць (ЛН) і пил-машин для різання рухомого прокату (МРДП).

На базі комплексу досліджень, проектних і налагоджувальних робіт у ВНІДМЕТМАШ (Всеросійський науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут металургійного машинобудування) були створені летючі ножиці з параметрами в 1,5-2,5 рази більшими, ніж у раніше застосованих конструкціях, по зусиллю різання, швидкості прокату, що розрізається, сортаменту профілів, точності відрізуваних довжин. Розроблені ножиці впроваджені на найбільших металургійних агрегатах, проектні потужності досягалися протягом 1-6 міс. після їх введення в експлуатацію. Комплекс машин для різання профілів (лист, куточок, квадрат, смуга, коло, труба, фасонні профілі та ін.) Призначений для установки на безперервно-заготовочних, сортових, листових і трубопрокатних станах, а також на агрегатах кабельного виробництва і поперечного різання.

Для реалізації нових технологічних процесів з використанням МРДП (безступінчасте регулювання відрізуваних довжин, безперервний розкрій, підвищена точність різання, висока якість та ін.) Необхідно було переглянути традиційні напрямки конструювання летючих ножиць, розробити нові схеми різання і ріжучого інструменту, нові конструкції машин і механізмів, а також системи автоматизованого електроприводу.

Однією з найголовніших завдань летючих ножиць, призначених для різання на мірні довжини, є забезпечення безперервного ряду відрізуваних довжин L із заданою точністю на максимальних швидкостях. Переваги безступеневого регулювання мірної довжини в потоці заготівельних і сортопрокатних станів полягають в тому, що ад'юстажне обладнання не обмежує виробничі потужності основного устаткування стану; забезпечується подача мірних довжин в термостати або нагрівальні колодязі без теплових втрат, що особливо важливо для якісних сталей; виключаються або істотно спрощуються лінії обробки, в результаті чого зменшуються капіталовкладення, виробничі площі і кількість обслуговуючого персоналу, а також розширюються можливості виконання замовлень.

Середній цикл розробки і освоєння унікальних МРДП становить 5-8 років, тому зробити обґрунтований висновок про правильність конструктивного рішення можна як мінімум після року експлуатації.

Роботи зі створення нового покоління летючих ножиць для різання прокату були розпочаті приблизно в 1970 році у зв'язку з розробкою принципово нових технологічних процесів і корінною реконструкцією агрегатів, а також з оснащенням прокатних станів високопродуктивними ЛН і пилами з поліпшеними параметрами, які забезпечують різання на безперервний ряд мірних довжин, підвищену точність різання, висока якість торця, мінімальні відрізані кінці, розкрій строго по замовленнях.

Летючі ножиці і пилки були створені на основі важільних механізмів, які на відміну від планетарних і багатоланкових, які раніше застосовувалися, забезпечують роботу в режимах електричного вирівнювання швидкості (РЕВС) і запусків на різ. Максимальне спрощення кінематичної схеми і виключення механізмів пропуску різу і вирівнювання швидкості (де це технічно обґрунтовано) базувалися на досягненнях в області автоматизованого електроприводу, що забезпечують інтенсифікацію

перехідних процесів (розгін і гальмування), застосування РЕВС при безступінчастому регулюванні відрізуваних довжин.

Проектні та налагоджувальні роботи проводили в комплексі з науково-дослідними по вивченню технологічних навантажень і методів оптимізаційного проектування машин з активним використанням систем автоматизованого проектування. Такий підхід дав можливість створити ряд принципово нових машин і ріжучого інструменту, визначити резерви підвищення продуктивності машин і поліпшити якість технологічного процесу завдяки наближенню характеристик машин до необхідних. При розробці методів проектування були виділені головні проблеми: збільшення швидкохідності, розширення діапазону профілів, які якісно розрізаються, забезпечення безперервного ряду відрізуваних довжин, поліпшення якості різку і точності відрізання прокату.

Створення та промислове впровадження високопродуктивних летючих ножиць і металозберігаючих технологій розкрою прокату забезпечило:

- збільшення швидкостей прокатки і розмірів профілів, що розрізаються в потоці стану;
- розширення сортаменту профілів, що якісно розрізаються, і номенклатури мірних довжин строго по замовленнях в діапазоні 2,8 - 12 м (краще 24 м) і безступінчасте регулювання: безперервний технологічний процес на ділянці різання обвідних ліній НЗС, що мають продуктивність до 6 - 7 млн. т в рік ;
- збільшення надійності і ремонтпридатності машин.

Перехід на важільні механізми різання дозволив також освоїти беззалишковий розкрій прокату. Розробка і впровадження нових типів листових ножиць для отримання шевронного в плані переднього кінця перед завданням його в чистову кліть сприяло освоєнню нових технологічних

процесів і створення високопродуктивних широкосмугових станів гарячої прокатки, наприклад стану 2000 ВАТ "Северсталь" і НЛМК.

Крім того, збільшилася довговічність і спростилася конструкція ножів для сортових, листових і трубних станів, що виготовляються ремонтними службами металургійних підприємств. Створили нові конструкції ножів, що забезпечують якісне різання профілів на найбільш швидкохідних двобарабанных летючих ножицях, а також розробили і освоїли конструкції подаюче-стежучих роликів (ПСР) ЛН сортових станів для стабілізації зусилля притиснення роликів і скорочення часу переналагодження (налаштування) при переході на новий профіль.

Багато машин розроблені спеціально для забезпечення безперервності технологічного процесу, починаючи з заготівлі та закінчуючи виходом готової продукції. Високопродуктивні ЛН і металозберігаюча технологія розкрою (МСТР) прокату є новим етапом у розвитку прокатного виробництва, який досягнутий в результаті творчої співдружності ВНДІМЕТМАШ, ВНІДелектропривода, Старокраматорського машинобудівного заводу, а також металургійних заводів, на яких освоювалися нові машини.

У нових умовах техніко-економічні показники прокатних станів визначаються головним чином продуктивністю і якістю готового прокату. Крім традиційної проблеми підвищення точності геометричних розмірів поперечного перерізу, визначальною є проблема збільшення виходу придатного мірного прокату. Практично збільшити вихід придатного мірного прокату до 98% можна тільки при комплексному використанні нових конструкцій летючих ножиць, що забезпечують якісне різання на будь-яку задану довжину на всіх ділянках комплексу НЗС - сортовий стан.

Технічні характеристики вітчизняних МРДП знаходяться на рівні кращих світових зразків. Багато машин впроваджені на металургійних агрегатах СНД, а також поставлені на експорт, в тому числі і в розвинуті

капіталістичні країни. Експлуатаційні переваги машин полягають в тому, що в їх конструкції враховані специфіка і досвід обслуговування на вітчизняних металургійних заводах. Значні науково-технічні напрацювання дають можливість проводити модернізацію діючого парку машин, що забезпечує з мінімальні витрати, значне поліпшення технічних характеристик машин і розширення їх технологічних можливостей.

Для розробки уніфікованих рішень і реалізації принципу блочного конструювання були вивчені технологічні особливості більшості прокатних станів. Для летючих ножиць характерне поєднання механічного обладнання з автоматизованим електроприводом, що містить програмний комплекс управління з ЕОМ і стежучими системами. У процесі досліджень враховували, що розробка загальної теорії оптимальних систем і методів конструювання конкретних об'єктів знаходиться ще в стадії становлення.

Щоб результати досліджень могли бути використані безпосередньо в промисловості і допомогли б вирішити виробничі проблеми ефективно і в короткі терміни, при розробці методів оптимізаційного проектування були виділені головні проблеми створення машин: підвищення швидкохідності, розширення сортаменту профілів, що розрізаються, забезпечення безперервного ряду відрізуваних довжин, підвищення їх якості і точності.

Ефективність запропонованих методів конструювання доведена розробленими моделями, які протягом багатьох років успішно експлуатуються на металургійних заводах країни і за кордоном.

Створення і широке впровадження на нових і реконструйованих прокатних станах високопродуктивних машин різання рухомого прокату забезпечило ефективне різання на безперервних заготовочних, безперервних широкосмугових станах гарячої прокатки (НШС), сортових станах, агрегатах трубопрокатних і поперечної різання (АПР).

Розглянемо найбільш важливі конструкції летючих ножиць, класифікованих за технологічним призначенням. Летючі ножиці великосортних і заготівельних станів виконуються з кривошипно-коромисловим механізмом різання. Продуктивність станів збільшують в основному шляхом розширення перетинів заготовок, підвищення швидкостей прокатки і скорочення паузи, а також збільшення розмірів заготовки.

Летючі ножиці для обвідних ліній. Створення потужних ножиць дозволило на якійсь новій основі вирішити проблему різання на обвідних лініях заготівельних станів. Нове планування стану, пов'язане з заміною стаціонарних ножиць, забезпечує безперервний технологічний процес на ділянці різання і дозволяє отримати ряд довжин заготовок в діапазоні $L = 4-12$ м при швидкості руху прокату $V_m = 2,3-2,5$ м / с і роботі ножиць в режимі електричного вирівнювання швидкості (РЕВС).

В даний час на Західно-Сибірському, Магнітогорському і Макіївському металургійних комбінатах, де успішно експлуатуються три різновиди таких ножиць з зусиллям різання 4 МН. Розроблено проект головного зразка ножиць для обвідних ліній з $P = 8$ МН для різання квадратів зі стороною 200 мм з високолегованих сталей. Виготовлення таких ножиць погоджено з провідними заводами важкого машинобудування.

Летючі ножиці заготівельних станів, що встановлюються за чистовою групою клітей, виконуються із зусиллями різання 16-25 МН і забезпечують різання на довжини 4 - 12 м квадратів до 150x 150 мм "на діагональ" при швидкостях руху прокату до 6 м / с. Розроблено дві моделі таких ножиць. Перша модель з $P = 2,5$ МН забезпечує різання зі швидкістю ≤ 4 м / с. Головний зразок кривошипно-коромислових ножиць для заготовки 120x120 мм з високолегованих сталей успішно експлуатується з 1978 р на обтисно-заготівельному стані 950/850/750 в Румунії. Система автоматизованого електроприводу, виконана ВНІелектроприводом повністю на вітчизняному обладнанні, забезпечує відхилення довжини від заданого значення в діапазоні

від 6 до 12м не більше 10-20 мм, а в кожній партії - не більше 5-10 мм. Румунською стороною було проведено зіставлення даних експлуатації аналогічних летючих ножиць, поставлених фірмами ФРН для іншого стану, яке показало, що Російське обладнання не поступається за якісними показниками.

Розроблено проект ножиць для різання заготовки 170x170 мм. Вдосконалений кривошипно-коромисловий механізм різання забезпечує при бічних зазорах 2-3 мм отримання вертикального перекриття 250 мм, необхідного для різання "на діагональ". Відзначимо, що діагональ квадрата 170 мм в 1,21 рази більше, ніж квадрата 140 мм, що розрізається ножицями фірм ФРН (більш складної конструкції) з паралелограмним механізмом різання. Нова конструкція забезпечує в два рази менші кути повороту ножів в зоні різання і збільшення в 1,3 рази їх вертикального перекриття в порівнянні з відомими схемами (при рівних бічних зазорах між ножами).

Друга модель летючих ножиць виконана з $P = 1,6$ МН і забезпечує різання на довжини 4,5-12 м квадратів до 130x130 мм "на діагональ" зі швидкістю 6 м / с. Ножиці призначені для заміни планетарних і кривошипно-ексцентрикових і мають масу механічного обладнання 110т.

Для порівняння наведені характеристики трьох моделей для важеля планетарних ножиць з $P = 1,5$ МН (слід враховувати, що в обладнання зазвичай входить запасний комплект барабанів, тому кривошипно-коромислові ножиці в 2 рази легше важеле-планетарних):

Таблиця 1. Маса обладнання летючих ножиць.

Найменування	1967 р.	1975 р.	1984 р.
Ножиці в зборі, т	451,6	370	345,9
Верхній барабан, т	73,8	58,3	56,6
Нижній барабан, т	76,7	59,9	57,3

Летючі ножиці сортових і дрібносортових станів. Найбільшого поширення набули ножиці на основі двобарабаних, кривошипно-коромислового і паралелограмного механізмів різання. Раціональне використання особливостей цих механізмів дало можливість створення універсальних летючих ножиць з комбінованим механізмом різання, що забезпечують різання на короткі мірні довжини і на довжини холодильника.

Двобарабанні ножиці без механізму пропуску різ (МПР) мають беззаперечні переваги, які полягають в простоті конструкції, надійності, швидкохідності і врівноваженості обертових частин. До недоліків, які обмежують їх технологічні можливості, можна віднести обертальний рух ножів, що утруднює різання з великими вертикальними перекриттями різальних крайок при необхідних бічних зазорах.

Ефективним напрямком розширення технологічних можливостей двобарабаних ножиць є профілізація ножів для забезпечення якісного різання різних профілів. У зв'язку з цим були створені конструкції ножів для різання куточків, швелерів, круглих і шестигранних профілів, термозміцнюючого прокату, тонких смуг. Наприклад, леткі ножиці агрегату поперечного різання (АПР) 1,2-4x1850 НЛМК мають ножі, профільовані по укороченим епіциклоїдам. Завдяки цьому розробили і впровадили новий ріжучий

інструмент просто геометричної форми зі збільшеним числом ріжучих крайок і кутом їх нахилу, а також механізм різання зі зменшеним моментом інерції, що забезпечує скорочення динамічних навантажень при регулюванні відрізуваної довжини. Таким чином, створена конструкція летючих ножиць АПР без складних кривошипних механізмів вирівнювання швидкості. Результати досліджень і експлуатації показали, що ножі нової конструкції забезпечують високу якість різу і мають в 3-4 рази більшою довговічністю різальних крайок у порівнянні з застосовувалися. В результаті були істотно скорочені простої агрегату при зміні ножів, а потреба в ножах зменшилася в 15-16 разів. Нові конструкції ріжучого інструменту успішно експлуатуються також на двобарабаних ножицях багатьох сортових станів, наприклад, на станах 250/350 Електростальського і Лієпайського металургійних заводів, ресорному стані ВАТ «Мечел» і ін. Двобарабані летючі ножиці з $P = 0,25-1$ МН мають різні модифікації в залежності від технологічного призначення, зусилля різання і виконання.

Такі ножиці призначені для аварійної різання між групами клітей, різання на безперервний ряд довжин в діапазоні $L = 2,7-12$ м при $V_m = 3-7$ м / с і на довжини холодильника при $V_m = 3-22$ м / с. Машини оснащені спеціальним ріжучим інструментом, що забезпечує якісне різання профілів, в тому числі куточків, швелерів і двотаврів.

Летючі ножиці такої конструкції можуть бути ефективно використані при реконструкції сортопрокатних станів. Двобарабані ножиці з $P = 0,25$ МН для різання на довжини холодильника 80-110 м при $V_m = 5-20$ м / с призначені для різання кола діам. 12-40 мм, теплообробної арматури (в дві або чотири нитки), куточків до розміру 50x50 мм і швелерів до 64x32 мм. Дана конструкція може бути використана для заміни ножиць фірми «SKET», які встановлені на деяких сортових станах і, на жаль, не відповідають сучасним технологічним вимогам.

Розроблена конструкція ножиць має такі переваги: розширення технологічних можливостей завдяки поліпшенню технічних характеристик при потужності приводного двигуна не більше 500 кВт; максимально проста конструкція (без МПР), що забезпечує підвищену надійність, ремонтпридатність і точність різання по довжині; можливість різання куточків, швелерів, квадратних, круглих і шестигранних профілів, термообробленого прокату в чотири нитки; зусилля різання $P = 0,25$ МН в порівнянні з 0,16 МН на існуючих летючих ножицях фірми «SKET»; невеликі габарити, завдяки яким вони встановлюються на місце існуючих; можливість використання основних елементів існуючого електрообладнання ножиць.

Таким чином, пропоновані летючі ножиці перевершують відомі аналоги по комплексному критерію: продуктивність, зусилля різання, швидкохідні, питома потужність встановленого електрообладнання, питома металоємність, надійність і ремонтпридатність, можливість різання різноманітного сортаменту ножами з калібрами, простота швидко зношується ріжучого інструменту, вартість виготовлення і витрати на монтаж.

Універсальні летючі ножиці з комбінованим механізмом різання для різання на короткі мірні довжини і на довжини холодильника виконані з комбінованим механізмом різання (Паралелограмне або кривошипно-коромислове, а також двобарабанне). Розроблено розмірний для зусиль 0,25-0,8 МН. Нова конструкція поєднує переваги двобарабаних і шарнірних чотириланкових ножиць. Технологічні переваги наступні: забезпечується отримання широкого діапазону відрізуваних довжин; поліпшуються якість різання і точність відрізуваних довжин; розширюється сортамент профілів, що якісно розрізаються (в тому числі тонкостінних куточків, швелерів і Z-профілів); різ відповідає технологічним вимогам; підвищуються швидкохідність і надійність. Одним з важливих переваг даного типу ножиць, що встановлюються перед холодильником стану, є забезпечення двох режимів роботи: спеціального на безперервний ряд коротких довжин в діапазоні $L =$

2,8-24 м при швидкості руху прокату 3-10 м / с; на довжини холодильника при $V_M = 3-22$ м / с (в залежності від технологічних режимів прокатного стану).

Спеціальний режим високоякісного різання смуг в гарячому стані в потоці стану застосовують при виробництві прокату з високолегованих сталей і сплавів (малотонажні партії). У цьому випадку забезпечується завантаження термостатів, а іноді не потрібно використання холодильника і досить складного правильно-ріжучого агрегату, який не пройшов промислового випробування, але рекомендується інофірмами для установки за холодильниками реконструйованих станів. Отже, забезпечується гнучка і надійна технологія виробництва прокату.

Головний зразок універсальних ножиць з комбінованим механізмом різання (Паралелограмним і двобарабанним) успішно експлуатується на дрібносортному стані, що випускає прокат з високолегованих сталей і сплавів. Ножиці забезпечують високу якість різу (перпендикулярність і відсутність загинів решт навіть при різанні кола діам. 11-13 мм), високу точність відрізаних довжин (фактичний розкид по довжині менше вимог стандартів на 20%). Якість різу забезпечує таврування на торці і завдання прокату в фільтру волоочильних станів методом запресовування (без загострення кінців), а також дозволяє економити метал і вивільнити точильники.

У процесі створення цієї конструкції були реалізовані численні принципово нові схемні і конструкторські рішення, що дозволили вирішити нові науково-технічні проблеми проектування і експлуатації МРДП різного призначення.

Барабанні летючі ножиці для обрізки кінців гарячого підкату безперервних широкосмугових станів 1200 – 2500 забезпечують різання смуг товщиною до 80 мм. На підставі врахування особливостей технологічного процесу для ножиць нового покоління розроблена конструкція спеціального ріжучого інструменту (PI), що забезпечує підвищення техніко-економічних

показників і надійності. Нові науково-технічні рішення особливо ефективно можуть бути використані при модернізації діючих ножиць.

В роботі (виміри і експериментальні дослідження проводилися безпосередньо на станах) показано, що існуючі конструкції з традиційно застосовуваним ріжучим інструментом (ножами), розробленим за методикою СКМЗ не забезпечують максимально можливого зниження динамічних навантажень в чистових клітках стану при захопленні переднього кінця смуги в зв'язку з незначним виступом шеврони, а також не дозволяють отримувати оптимальну форму переднього і заднього кінців смуги забезпечує максимальне зниження динамічних навантажень.

Найбільш ефективним шляхом зниження ударних навантажень при захопленні вважається прокатка слябів і смуг з формою переднього кінця у вигляді еліпса, рівнобічної трапеції або шеврони зі збільшеною висотою виступу. При цьому досягається значне зниження динамічних навантажень у всіх клітках стану, що сприяє підвищенню техніко-економічних показників. Опуклий симетричний передній кінець розкату забезпечує захоплення смуги строго по центру, що запобігає кидки смуги в сторону, які викликають її «буріння» в чистовий групі і втрату продуктивності через простої стану.

Дослідно-промислове випробування показало, що динамічні навантаження в період захоплення смуги і коливальні процеси в цьому випадку знижуються одночасно у всіх клітках стану і за рахунок цього збільшується в 4-6 разів довговічність обладнання, зменшуються число поломок валків і шпинделів, а також відходи в обріз. Аналогічні результати можуть бути отримані при обрізанні заднього кінця смуг з оптимальною конфігурацією форми різку.

По суті, модернізація ножиць, що мають барабани з двома парами ножів, зводиться до заміни верхнього і нижнього барабанів новими, на яких будуть встановлені одна пара ножів для обрізки переднього кінця і друга – для

заднього. Ножі, призначені для переднього кінця прокату, забезпечують фігурний рез в плані (шеврон, трапеція) з рекомендованою величиною виступу. Залежно від поставленого завдання зазначені технологічні переваги можуть бути досягнуті шляхом установки нових барабанів з новими ножами або тільки нових ножів пропонованої конструкції практично без зміни конструкції барабанів (виготовляють ножі і нові деталі вузла їх кріплення – супорти).

Така модернізація може бути виконана і на ножицях НШС застарілої конструкції (оснащених тільки однією парою ножів). При установці двох пар ножів зменшується майже в два рази кут розгону механізму різання, а при використанні існуючої схеми електроприводу зменшується бистроходність ножиць. Для модернізації таких ножиць розроблена оригінальна схема закону руху механізму різання при розгоні, реалізація якої забезпечує збереження існуючого електроприводу без зниження швидкісних характеристик. Така модернізація планується на стан 2500 Магнітогорського металургійного комбінату.

Модернізація діючих МРДП може бути успішно проведена при використанні накопиченого науково-технічного потенціалу, що дає можливість значного поліпшення технічних характеристик парку машин, з мінімальними витратами і в короткі терміни силами ОГМ металургійних заводів. Наприклад, результати досліджень показали, що багато ЛН з кривошипно-коромисла різання поставки СКМЗ мають неоптимальні параметри. В результаті цього їх резерв міцності по зусиллю різання і розширенню діапазону, що розрізають профілів не може бути реалізований. Модернізація допоможе істотно розширити сортамент профілів. Прикладом такої модернізації можуть служити кривошипно-коромислові ЛН АПР-1 ММК (проведена в співдружності з фахівцями комбінату), в результаті якої були значно розширені технологічні можливості і стало можливим розрізати прокат збільшеної товщини і з більш високими механічними характеристиками. Так,

якщо до модернізації ножиці забезпечували різання смуги товщиною 10 мм з $\sigma_{\text{в}} \leq 500$ Мпа, то після модернізації – товщиною 14 мм з $\sigma_{\text{в}} \leq 600$ Мпа. Для поділу таких смуг на механізмі старої конструкції треба було б зусилля різання в 2,3 рази більше. Крім того, завдяки наближенню руху ножів до поступального підвищується надійність різання тонких смуг. На двобарабанних ножицях АПР також можна замінити існуючий ріжучий інструмент на більш досконалий.

Застаріла механічна частина летючих ножиць може бути замінена новим механічним обладнанням при збереженні основних елементів електроприводу. Багато сортопрокатні стани оснащені ножицями застарілої конструкції (планетарними, двобарабанних і ін.), які часто не забезпечують вимоги технології по номенклатурі відрізуваних довжин, швидкохідності, якості різку. Зазначені проблеми в багатьох випадках можуть бути успішно вирішені в результаті часткової модернізації: заміни механічної частини ножиць, механізму різання, ріжучого інструменту (наприклад, установка нових ножів для різання кутка, швелера, двутавра і інших складних профілів). Результати аналізу показали, що реалізація нових розробок дозволяє навіть збільшити швидкохідність при заміні тільки застарілого механічного обладнання при існуючій потужності електроприводу. Таким чином, підвищення техніко-економічних показників стану забезпечується при мінімальних витратах на модернізацію існуючих ножиць. Деякі нові конструктивні і технологічні рішення по удосконаленню ріжучих машин наведені в роботах.

Ножиці для МНЛЗ в залежності від виду приводу виконуються гідравлічними або механічними. В останні роки металургійні підприємства з відомих причин (умови експлуатації, вартість обслуговування, пожежонебезпека) вважають за краще ножиці з механічним приводом. Техніко-економічні показники та займана площа МБЛЗ багато в чому залежать від конструкції летючих ножиць. Особливу складність представляє створення

ножиць з механічним приводом для многоручевих МНЛЗ з кроком струмків менше 1000 мм. На підставі багаторічного досвіду проектування розроблена конструкція уніфікованих ножиць для МНЛЗ з кроком струмків 600-700 мм і більше з наступними основними характеристиками: розрізається профіль – квадрат зі стороною 150 мм і більше; зусилля різання 2,5 МН і більше; маса не більше 20 т. Ножиці відрізняються винятковою простотою (відсутні багато зайві елементи). Модифікації нової конструкції летючих ножиць для МНЛЗ можуть бути застосовані для різання більших профілів, наприклад слябів прямокутного перетину із зусиллям різання до 12 МН при відношенні його до маси механічного обладнання близько 0,05 – 0,1.

У випадку, коли порізка перетинів рухомого прокату не може бути реалізована за допомогою «летючих ножиць», використовують більш складне рішення механізму — «летюча пила».

Незалежно від виду продукції, що виробляється і галузі промисловості, застарілі системи мають схожу функціональну схему і принцип роботи: Матеріал (профіль, труба чи т.п.) безперервно подається в зону різ; на каретці встановлено датчик довжини, який безперервно виконує вимір, система захоплення матеріалу і пила з системою подачі. При досягненні заданої довжини, виконується захоплення матеріалу спеціальним пристроєм, здійснюється розгін каретки до швидкості руху матеріалу, пила притискається до матеріалу системою подачі, здійснює різ, після досягнення кінцевої точки, пила повертається назад. Після повернення пили в початкове положення, запускається в роботу двигун, який за допомогою передачі (наприклад, ланцюгової) повертає каретку, жорстко закріплену затискачем на ланцюзі, у вихідне положення. Застарілі системи мали на увазі використання виключно механічних систем для розгону каретки (за рахунок руху матеріалу) і різке повернення каретки назад прямим пуском асинхронного двигуна. Управління всіма елементами реалізовувалося на стандартних релейних схемах.

В процесі роботи "летючої пили", до модернізації, виникав ряд проблем:

1. При різанні досить тонкого профілю або труб, під час захоплення, виникає велике навантаження, внаслідок чого матеріал деформувався;
2. Прямий пуск двигуна каретки викликав сильні механічні напруги в системі приводу, так як каретка рухалася в протилежну сторону, поступово руйнувала редуктор і рвала ланцюг;
3. Максимальна швидкість лінії рідко перевищувала 60 метрів в хвилину;
4. Було складно узгодити роботу «летючої пили» з роботою виробничої лінії.

1.4. Аналіз сучасних систем керування електромеханічних механізмів переміщення.

Так як для «летючої» пили, що забезпечує відріз металевих труб похибка відпрацювання положення не повинна перевищувати 0,5мм при змінному завданні за положенням, так і для багатьох інших сучасних систем вирішення проблеми точності позиціонування є дуже важливим. Існують багато варіацій інженерного рішення цього питання, деякі з них представлені нижче.

Електричний режим дугової сталеплавильної печі (ДСП) протягом плавлення є нестабільним і супроводжується різкими коливаннями потужності. Забезпечення заданого електричного режиму печі здійснюється регулюванням довжини дуги та, через це, струму дуги. Таким чином, безумовно, важливими є питання, що пов'язані з побудовою системи автоматичного управління (СУ) приводом переміщення електродів ДСП, яка здійснює вимірювання параметрів, що впливають на плавлення та виробляє

керуючі впливи по закладеному алгоритму для забезпечення встановленого електричного і технологічного режиму роботи печі.

При цьому, з огляду на ускладнення технологічних процесів, постійно зростає рівень вимог до цього устаткування. Отже, стає необхідним все більш різнобічний та точний аналіз режимів дії електротермічного устаткування та проведення модернізації систем автоматичного керування цим устаткуванням. Останніми роками дослідження встановленої проблеми проводилося в роботах, у яких були розглянуті математичні моделі отриманих систем управління та аналіз їх дії. У даних роботах запропоновані різноманітні підходи до побудови приводів переміщення електродів (ППЕ), їх автоматичних регуляторів та алгоритмів дії таких регуляторів. Тут проаналізовано умови протікання плавильного процесу ДСП. Визначені показники стану цієї системи. Запропоновано структуру СУ ППЕ ДСП та сформульовані вимоги до її дії. Складено граф-схему алгоритму дії СУ ППЕ. Описані можливі стани системи та переходи між ними. Визначені можливі умови переходу системи до аварійного стану та способи повернення її до нормального режиму роботи. Робота автоматичного регулятора, що діє за складеним алгоритмом, забезпечує економію електроенергії та матеріалу електродів при протіканні плавильного процесу в ДСП. Мінус такого автоматичного управління — це відсутність врахування нелінійностей до алгоритму роботи регуляторів. Тому, за таким виконанням, не буде забезпечуватися нульова статична похибка за вихідною координатою.

Сучасні багатоповерхові адміністративні та житлові будівлі, магазини, учбові заклади, лікарні та інші об'єкти для полегшення та прискорення пересування людей, вантажів по висоті обладнують засобами вершинного пересування. З усіх різновидів вершинних підйомників найпопулярнішими є ліфти. Ліфтами обладнують приміщення в яких вантажі або людей доставляють на різні рівні механізованим способом. До таких приміщень відносяться житлові та адміністративні будівлі.

Якісна робота ліфтів і підйомних механізмів та їх надійність залишається одним з ключових аспектів у справі забезпечення безпеки житлових і громадських будівель, тому необхідний безперервний розвиток і модернізація ліфтового обладнання.

Видима останнім часом тенденція до підвищення поверховості будівель в містах, а також до комфорту пересування в ліфтах веде до ускладнення систем управління процесом пересування. Завдяки розвитку сучасних мікропроцесорних систем управління дані завдання успішно вирішуються в даний час. Так, наприклад, існуючі системи підпорядкованого керування з ПП – регуляторами технологічних параметрів замінюються більш складними адаптивними та оптимальними регуляторами. Вони дозволяють підвищити якість позиціонування кабіни ліфту, забезпечити високу якість перехідних процесів, та збільшити інваріантність системи до зовнішніх та параметричних збурень. Система керування такими приводами будується за принципом підпорядкованого керування із зовнішнім контуром керування положенням, що містить нелінійний або комбінований адаптивний регулятор. Так, наприклад, для вирішення задач синхронного переміщення двох приводів більшість виробників обладнання рекомендують використовувати випереджувальне керування (feed forward). Недоліком цього керування є можливість компенсації лише статичної похибки за положенням і неможливість компенсувати інші нелінійні впливи, зумовлені пуском та гальмуванням приводу, наявністю люфту у виконавчому механізмі. Також, досить часто використовуються модальні регулятори, що забезпечують високу швидкодію електромеханічних систем, однак досить складні в налаштуванні, внаслідок складності вибору поліному якості при наявності нелінійностей.

1.5. Висновки по розділу.

Установка «летючі ножиці» не завжди могла виконувати свої функції з прокатним станом. У випадку, коли не можлива реалізація порізки перетину прокатного стану, використовують установку «летюча пила». Виконання

установки «летюча пила» застарілими системами мала на увазі використання виключно механічних систем для розгону каретки (за рахунок руху матеріалу) і різке повернення каретки назад прямим пуском асинхронного двигуна. Управління всіма елементами реалізовувалося на стандартних релейних схемах. З такою конструкцією установки при різанні досить тонкого профілю або труб, під час захоплення, виникає велике навантаження, внаслідок чого матеріал деформується, прямий пуск двигуна каретки викликає сильні механічні напруги в системі приводу, так як каретка рухається в протилежну сторону, то вона поступово руйнує редуктор та час від часу розриває ланцюг. Також максимальна швидкість лінії рідко перевищувала 60 метрів на хвилину, і було складно узгодити роботу «летючої пили» з роботою виробничої лінії. Тому, для підвищення продуктивності, слід винувати установку із допомогою стандартних засобів управління сучасного автоматизованого електроприводу з цифровим мікропроцесорним управлінням, а для якісного вирішення позиціонування потрібне використання допоміжних засобів програмованої обчислювальної техніки.

Розглянуті вище інженерні рішення проблеми точності позиціонування вказали на те, що в контурі керування положенням слід використовувати не всім відомі існуючі системи підпорядкованого керування з ПІ-регулятором технологічних параметрів, а більш складні адаптивні та оптимальні регулятори. Наприклад, для вирішення задач переміщення можна використовувати випереджувальне керування або модальні регулятори, але в них є свої мінуси.

Розділ 2. Аналітичне конструювання оптимального регулятора методом Пірсона.

2.1. Аналіз існуючих електромеханічних систем позиціонування з використанням складних регуляторів положення.

Для «летючої» пили, що забезпечує відріз металевих труб похибка відпрацювання положення не повинна перевищувати 0,5мм при змінному завданні за положенням. При цьому завдання за положенням змінюється зі швидкістю вище 1м/с внаслідок необхідності жорсткої синхронізації переміщення труби та «летючої» пили під час різу. Використання стандартного ПІ – регулятора положення при великих швидкостях різу є неможливим, оскільки зміна завдання за положенням є лінійною функцією, та при використанні ПІ – регулятора в системі не буде забезпечуватися нульова статична похибка за вихідною координатою. Тому, в сучасних електромеханічних системах знаходять широке розповсюдження приводи «летючої» пили на базі синхронного двигуна з постійними магнітами. Система керування цими приводами будується за принципом підпорядкованого керування із зовнішнім контуром керування положенням, що містить нелінійний або комбінований адаптивний регулятор. Так, наприклад, для вирішення задач синхронного переміщення двох приводів більшість виробників обладнання рекомендують використовувати випереджувальне керування (feed forward). Недоліком цього керування є можливість компенсації лише статичної похибки за положенням і неможливість компенсувати інші нелінійні впливи, зумовлені пуском та гальмуванням приводу пили, наявністю люфту у виконавчому механізмі. Також, досить часто використовуються модальні регулятори, що

забезпечують високу швидкодію електромеханічних системи, однак досить складні в налаштуванні, внаслідок складності вибору поліному якості при наявності нелінійностей.

2.2.1. Порівняльна характеристика існуючих методів розв'язання оберненої задачі динаміки.

Зворотні задачі динаміки в теорії автоматичного управління.

Теорія автоматичного управління і регулювання розвивалася незалежно від виникнення і розвитку концепцій обернених задач динаміки. Починаючи з перших найпростіших автоматичних регуляторів, інженери та конструктори створювали автоматичні системи, які забезпечували протікання керованих процесів по бажаним законам. В результаті в теорії автоматичного управління розроблено велику кількість практичних прийомів і методів, які успішно застосовуються при проектуванні і створенні автоматичних систем різного призначення. В основі кожного методу закладені концепції зворотних задач динаміки керованих систем.

Дійсно, частотні методи розрахунку і проектування систем автоматичного регулювання та керування засновані на наближенні частотних характеристик проектованої системи до відповідних характеристик бажаного виду, тобто процеси в проектованої системі повинні бути близькі до процесів, що протікають в деякій еталонній системі, що відповідає вимогам технічного завдання на проектування.

Розрахунок параметрів систем автоматичного регулювання кореневими методами також заснований на наближенні динамічних характеристик проектованої системи до відповідних характеристик деякої еталонної системи. Міра близькості динамічних характеристик в таких процедурах розрахунку визначає відповідність між розподілами коренів характеристичних рівнянь проектованої і еталонної систем.

У теорії автоматичного управління широкий розвиток отримали методи синтезу замкнутих систем, засновані на вирішенні оптимізаційних задач з використанням різних функціоналів, які характеризують якість процесів управління. Велике число процедур було розроблено для параметричної оптимізації систем регулювання за критерієм мінімуму інтегральних квадратичних оцінок, введених А.А. Красовським ще в 40-і роки.

За визначенням інтегральними квадратичними оцінками даної системи є:

- Оцінка нульового порядку;
- Оцінка першого порядку;
- Оцінка n -го порядку.

Для обчислення інтегральних квадратичних оцінок розроблені різні прийоми і способи, які можна знайти в навчальній літературі з теорії автоматичного регулювання.

Завдання формулюється в такий спосіб. Задана структура динамічної системи; деякі параметри системи є змінними, а інші повинні залишатися незмінними. Потрібно знайти такі значення змінних параметрів, при яких реалізується мінімум будь-якої інтегральної квадратичної оцінки. Сформульована задача є задачею параметричної оптимізації динамічної системи. Знайдені в результаті її рішення параметри іменуються оптимальними, а систему з такими параметрами називають оптимальною по перехідному процесу.

Схема рішення задачі параметричної оптимізації в аналітичній формі така. Нехай є такі параметри, які необхідно визначити з умови реалізації мінімуму прийнятої інтегральної квадратичної оцінки. Вираз для оцінки містить невідомі параметри. Оптимальні значення параметрів визначаються з рівнянь. Практично параметрична оптимізація проводиться із застосуванням чисельних методів, так як в аналітичному вигляді рішення

може бути отримано в найпростіших випадках. Вирази для оцінки виявляються громіздкими, а рівняння для оптимальних параметрів нелінійні.

Однак, як показано в роботах А.А. Красовського і А.А. Фельдбаум, оптимальність системи за інтегральним квадратичним критерієм рівнозначна тому, що помилка системи як функція часу підпорядковується в процесі управління відповідного диференціального рівняння.

При вирішенні зворотної задачі динаміки, характерної для завдань управління, що полягає в тому, щоб по заданих або бажаних кінематичних характеристиках руху побудувати систему диференціальних рівнянь динаміки, методи А.М. Ляпунова мають вже більш практичне застосування, так як при побудові рівнянь динаміки враховується вимога стійкості бажаних кінематичних характеристик та рівняння збуреного руху будуються легко.

2.2.2. Принцип оптимальності. Рівняння Беллмана для нестационарних систем.

Метод динамічного програмування, розроблений Р.Беллманом, ґрунтується на сформульованому їм принципом оптимальності, що говорить наступне.

Нехай задана система диференціальних рівнянь

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x, u) \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

$$I = \int_0^t [W(x) + \omega(u)] dt$$

і функціонал .

Задано початкові і граничні умови

$x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0)$ и

$x_1(T), x_2(T), \dots, x_n(T)$.

Принцип оптимальності. Оптимальне поводження володіє тією властивістю, що які б ні були первісний стан і рішення у початковий момент, наступні рішення повинні складати оптимальне поводження щодо стану, що виходить у результаті першого рішення.

Нехай мається екстремаль $x(0) - x(T)$ (рис. 2.1) і точка $x(t_1)$ ділить її на дві ділянки.

Тоді відповідно до принципу оптимальності ділянка траєкторії від точки до точки також буде оптимальною траєкторією.

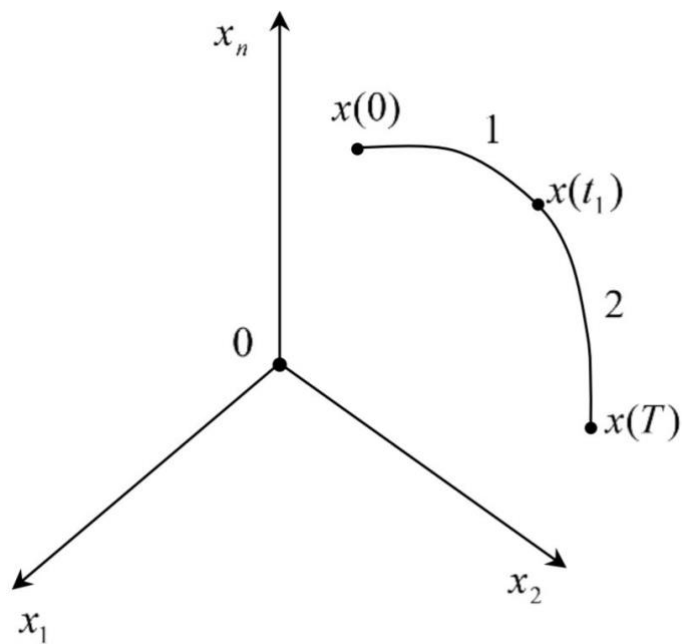


Рисунок 2.1. Вид оптимальної ділянки траєкторії.

Відповідно до принципу оптимальності позначимо через $V(x_0, t)$ мінімальне значення функціоналу:

$$V(x, t) = \min_u \int_{t_0}^T W(x, u, \tau) d\tau.$$

Представимо інтеграл у виді суми

$$V(x, t) = \min_u \left[\int_{t_0}^{t+\Delta t} W(x, u, \tau) d\tau + \int_{t+\Delta t}^T W(x, u, \tau) d\tau \right].$$

Для першого доданка, з огляду на малість Δt , запишемо

$$\int_{t_0}^{t+\Delta t} W(x, U, \tau) d\tau = W(x, U, t) \Delta t + O_1(\Delta t),$$

де $O_1(\Delta t)$ - мала більш високого порядку малості, чим Δt .

Другий доданок має вид

$$\min_u \left[\int_{t+\Delta t}^T W(x, u, \tau) d\tau \right] = V[x(t + \Delta t), t + \Delta t].$$

Тоді після заміни одержимо

$$V(x, t) = \min_u [W(x, u, t)\Delta t + V[x(t + \Delta t), t + \Delta t] + O_1(\Delta t)]$$

З огляду на те, що приріст Δt малий можна записати

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \frac{dx}{dt}\Delta t + O_2(\Delta t),$$

де $O_2(\Delta t)$ - мала більш високого порядку малості.

Вважаючи, що функція $V(x, t)$ має неперервні частинні похідні, розкладемо $V[x(t + \Delta t), t + \Delta t]$ в ряд Тейлора в околиці точки $x(t_0)$:

$$V\left[x(t) + \frac{dx}{dt}\Delta t + O_2(\Delta t), t + \Delta t\right] = V[x(t), t] + \sum_{i=1}^n \frac{dV}{dx_i} f_i(x, u, t)\Delta t + \frac{\partial V}{\partial t}\Delta t + O_3(\Delta t).$$

Підставимо цей вираз у формулу (1) і одержимо

$$V(x, t) = \min_u \left[W(x, u, t)\Delta t + V(x, t) + \sum_{i=1}^n \frac{dV}{dx_i} f_i(x, u, t)\Delta t + \frac{\partial V(x, t)}{\partial t}\Delta t + O_4(\Delta t) \right].$$

Поділимо обидві частини на Δt і перейдемо до границі.

З огляду на те, що $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{O_4(\Delta t)}{\Delta t} = 0$, одержуємо так назване функційне рівняння Беллмана:

$$-\frac{\partial V(x, t)}{\partial t} = \min_u \left[W(x, u, t) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial V(x, t)}{\partial x_i} f_i(x, u, t) \right].$$

Вводячи поняття градієнта функції $V(x, t)$ і позначаючи скалярний добуток

$$\langle \nabla V(x, t), f \rangle = \frac{\partial V}{\partial x_1} f_1 + \frac{\partial V}{\partial x_2} f_2 + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_n} f_n,$$

рівняння (2) можна записати в більш компактній формі:

$$-\frac{\partial V(x, t)}{\partial t} = \min_u [W(x, u, t) + \langle \nabla V(x, t), f(x, u) \rangle].$$

2.2.3. Рівняння Беллмана для стаціонарних систем

Для стаціонарних систем виду

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x, u) \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

і функціоналу
$$I = \int_0^T W(x, u) d\tau \quad T \rightarrow \infty,$$

де час переходу не фіксовано,
$$V(x_0) = \min_u \int_0^T W(x, u) d\tau,$$

мінімальне значення функціоналу буде функцією тільки $x(0)$ і не буде залежати від часу.

Графік підінтегральної функції зображений для системи при $n = 2$ рис.2.2.

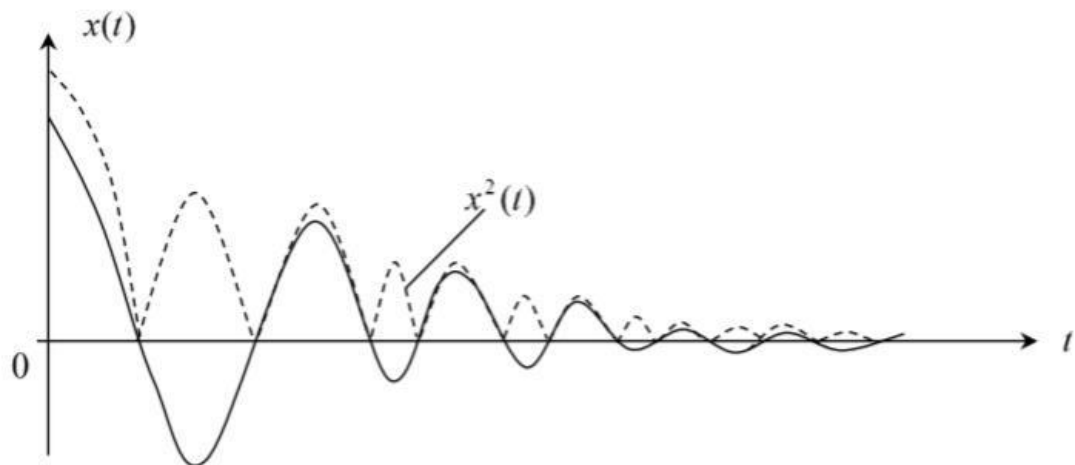


Рисунок 2.2. Графік підінтегральної функції

Тоді функціональне рівняння Беллмана набуває наступного вигляду:

$$\min_u [W(x, u) + \langle \nabla V(x, t), f(x, u) \rangle] = 0.$$

Рівняння регулятора чи закон керування визначається співвідношенням:

$$\frac{\partial W(x, u)}{\partial u} + \langle \nabla V(x), \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \rangle = 0,$$

звідки

$$u = F \left[\left\langle \nabla V(x), \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right\rangle \right] .$$

Це і є шукане оптимальне керування, що буде залежати від $\nabla V(x)$.

Одержавши рішення рівняння в частинних похідних, з якого виключено u , можна знайти явний вид оптимального керування.

Розглянемо процедуру одержання функціонального рівняння Беллмана.

Приклад I. Задано систему

$$W(p) = \frac{k}{p(Tp + 1)} = \frac{x(p)}{u(p)} .$$

Рівняння в операторній формі має вид: $(Tp^2 + p)x = ku$.

На керування u обмеження не накладене. Зробимо заміну змінних

$$x_1 = x, \quad x_2 = \dot{x} .$$

Спочатку отримаємо систему диференціальних рівнянь

$$\dot{x}_1 = x_2 ,$$

$$\dot{x}_2 = -ax_2 + bu , \quad a = \frac{1}{T}, \quad b = \frac{k}{T} .$$

Виберемо мінімізований функціонал у виді квадратичного критерію

$$I = \int_0^{\infty} (\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + cu^2) dt .$$

Функціональне рівняння Беллмана має вид:

$$\min_u \left[\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + cu^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} (-dx_2 + bu) \right] = 0 .$$

Після диференціювання одержуємо

$$2cu + b \frac{\partial V}{\partial x_2} = 0, \quad u = -\frac{b}{2c} \frac{\partial V}{\partial x_2} .$$

Крім u із заданої системи одержуємо

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 - \frac{\partial V}{\partial x_2} \alpha x_2 = \frac{b^2}{4c} \left(\frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^2$$

Це рівняння в літературі називають ще рівнянням Гамільтона - Якобі, що являє собою рівняння в частинних похідних першого порядку.

Права частина функціонального рівняння показана на рис. 2.3.

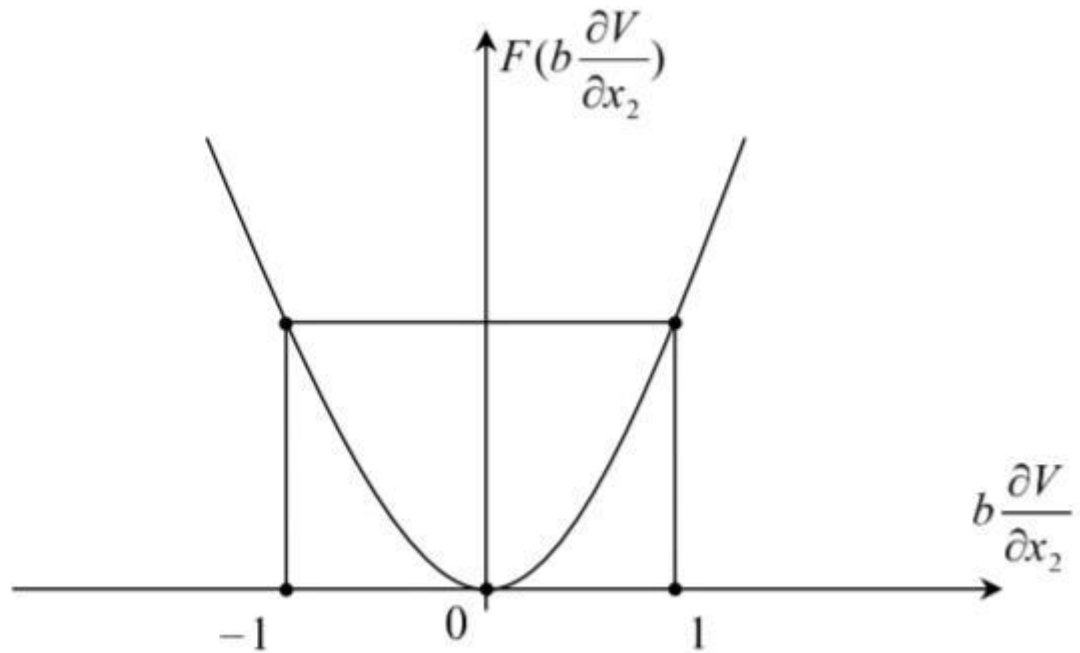


Рисунок 2.3. Графічне зображення вигляду правої частини функціонального рівняння

Потрібно знайти рішення цього рівняння – функцію $V(x)$ задовольняюче граничній умові

$$V[x(\infty)] = 0$$

Приклад 2. Розглянемо систему з передатною функцією

$$W(p) = \frac{k_0}{p^2} \text{ або } \ddot{x} = k_0 u \text{ при } |u| \leq 1.$$

Тут на керування накладене обмеження. Введемо позначення

$$x_1 = x, x_2 = \dot{x} \quad \begin{matrix} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = k_0 u \end{matrix}$$

і розглянемо в якості мінімізованого функціоналу критерій швидкодії

$$I = \int_0^T 1 dt, \quad \text{де } W(x) = 1 \quad \omega(u) = 0.$$

У підсумку одержуємо наступне функціональне рівняння:

$$\min_{-1 \leq u \leq 1} \left[1 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} k_0 u \right] = 0.$$

Оптимальне керування, що доставляє мінімум лівій частині рівняння Беллмана, має вид.

$$U = -\text{sign} \left(k_0 \frac{\partial V}{\partial x_2} \right).$$

тому що при цій умові останній член рівняння Беллмана завжди від'ємний. В підсумку рівняння Беллмана має вид:

$$1 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 = k_0 \left| \frac{\partial V}{\partial x_2} \right|.$$

На рис. 2.4 показана права частина рівнянь Беллмана.

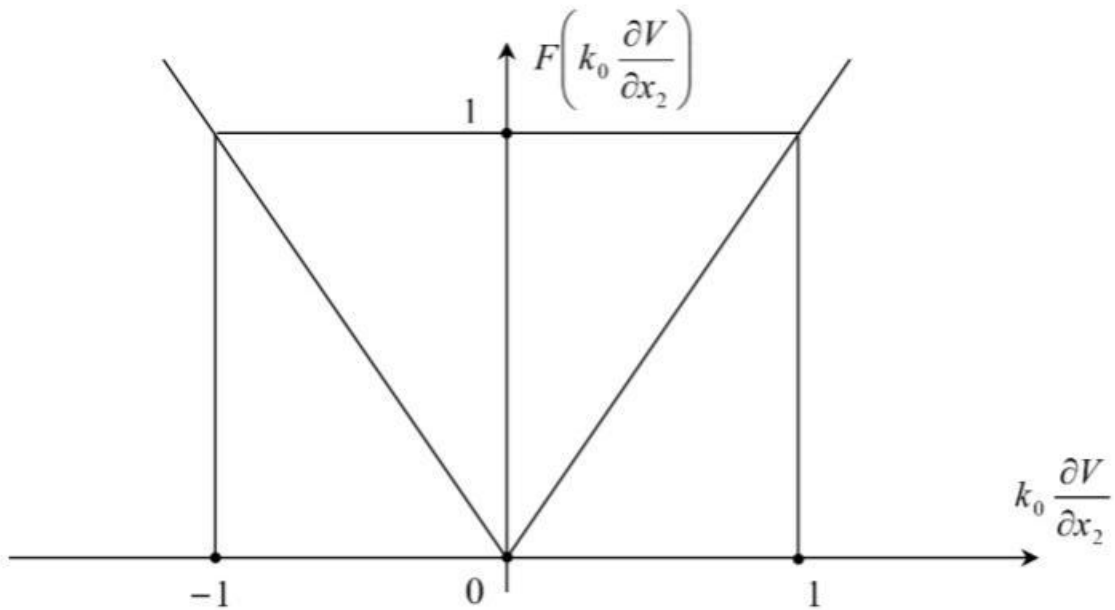


Рисунок 2.4. Графічне зображення вигляду правої частини рівняння Беллмана

Точне рішення даного рівняння можливо тільки для систем не вище другого

порядку. В загальному випадку рішення задачі синтезу можливо тільки для квадратичного функціонала і лінійних систем.

Задача синтезу оптимального регулятора називається аналітичний конструюванням регулятора.

Приклад3 Розглянемо приклад на отримання рівняння Беллмана при врахуванні обмеження піка насичення :

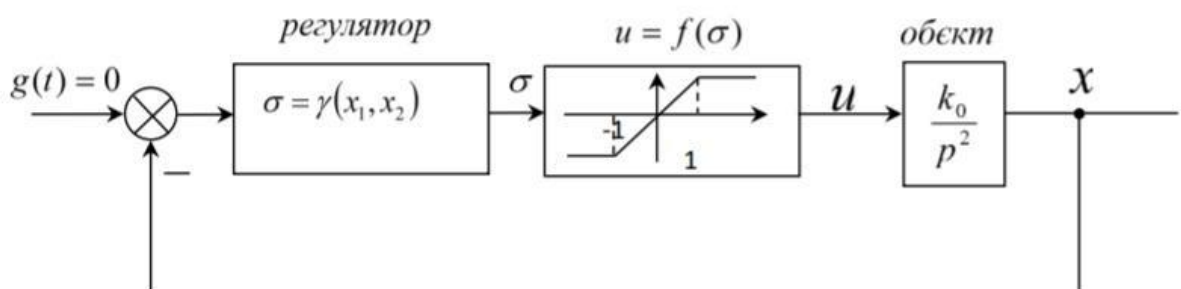


Рисунок 2.5. Математична модель керованого об'єкту

Тоді:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = k_0 u, \text{ де } u = f(\sigma) \text{ або в нормальному вигляді:}$$

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = k_0 u = k_0 \sqrt[3]{\sigma} \quad \text{Нехай } k_0 = 1,$$

запропонована $f(\sigma)$ функція наближено враховує ефект насичення керуючого впливу.

Критерій оптимальності має вигляд

$$\min_{\sigma} I = \int_0^{\infty} (\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + c \sigma^2) dt$$

Тоді функціональне рівняння Беллмана можна записати у вигляді

$$\min_{\sigma} \left[\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + c \sigma^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} \sigma^{1/3} \right] = 0$$

Втілюючи процедуру оптимізації отримуємо :

$$2c\sigma + \frac{1}{3} \frac{\partial V}{\partial x_2} \sigma^{-2/3} = 0$$

Звідки отримуємо оптимальний закон керування в дійсній формі

$$\sigma = - \left(\frac{1}{6c} \frac{\partial V(x_1, x_2)}{\partial x_2} \right)^{3/5}$$

Отримаємо оптимальне керування із функціонального рівняння Беллмана :

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + c \left(\frac{1}{\sigma c} \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^{6/5} + \frac{\partial V}{\partial x_2} x_2 - \frac{\partial V}{\partial x_2} \left(\frac{1}{\sigma c} \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^{1/5} = 0$$

Втілюючи зведення подібних членів :

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + c \left(\frac{1}{\sigma c} \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^{6/5} - 6c \left(\frac{1}{6c} \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^{6/5} = 0$$

Врешті отримуємо рівняння Беллмана в замкненій формі :

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 = 5c \left(\frac{1}{\sigma c} \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^{6/5}$$

Отримаємо нелінійне диференціальне рівняння в часткових похідних першого порядку типу Гамільтона – Якобі – Беллмана.

В літературі керування отримало також назву Беллмана – Ляпунова , оскільки шукана функція $V(x_1, x_2)$ володіє функція Ляпунова.

2.2.4. Рішення задачі аналітичного конструювання оптимальних регуляторів

(АКОР) для лінійних систем і квадратичного функціонала. Рівняння Ріккати. Ця задача вперше була розглянута Летовим А.М. Нехай маємо стаціонарний об'єкт керування

$$\dot{x}_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + b_i u \quad \begin{matrix} (i = 1, 2, \dots, n), \\ (j = 1, 2, \dots, n), \end{matrix}$$

і квадратичний функціонал якості

$$I = \int_0^{\infty} (\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i^2 + cu^2) dt$$

Тут керування - скаляр, тобто одномірний вхід. Функціональне рівняння Беллмана має вид

$$\min_u \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i^2 + cu^2 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + bu \right) \right] = 0$$

Диференціюючи , одержуємо закон керування:

$$u = -\frac{1}{2c} \sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial V}{\partial x_i}$$

Підставляючи рівняння регулятора у рівняння Беллмана , одержуємо функціональне рівняння в замкнутій формі:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i^2 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \sum_{j=1}^n d_{ij}x_j = \frac{1}{4c} \left(b_i \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \right)^2$$

Знайдемо рішення цього рівняння. Воно задовольняється квадратичною формою.

$$V(x_1, \dots, x_n) = \sum_{ij=1}^n k_{ij} x_i x_j$$

У загальному випадку ця квадратична форма повинна задовольняти вимогам позитивної знакосталості.

Частки похідні мають вид

$$\frac{\partial V}{\partial x_1} = 2(k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + \dots), \frac{\partial V}{\partial x_2} = 2(k_{21}x_1 + k_{22}x_2 + \dots)$$

тобто
$$\frac{\partial V}{\partial x_i} = 2 \sum_{k=1}^n k_{ik} x_k$$

Підставляючи у рівняння Беллмана одержуємо

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ik} \alpha_{ij} x_k x_j - \frac{1}{c} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n b_i k_{ik} x_k \right)^2 = 0$$

В лівій частині цього рівняння знаходиться квадратична форма від змінних x_1, x_2, \dots, x_n . Вона буде тотожно дорівнює нулю при рівності нулю всіх коефіцієнтів квадратичної форми.

У результаті одержимо

$$\alpha_i + 2 \sum_{i=1}^n k_{ij} d_{ij} - \frac{1}{c} \left(\sum_{i=1}^n b_i k_{ij} \right)^2 = 0 \quad (\text{при } j = k)$$

Ця система рівнянь носить назву системи рівнянь Ріккати. Число цих алгебраїчних рівнянь дорівнює $\frac{n(n+1)}{2}$.

В тому випадку, коли розв'язок задачі АКОР знаходиться в матричному виді, то отримуємо :

$$\dot{x} = Ax + bu \quad x(0) = x_0$$

x – n -мірний вектор, A - матриця $(n \times n)$, b – матриця $(n \times 1)$.

Мінімізований функціонал визначається співвідношенням

$$\min_u I = \int_0^{\infty} [x^T Q x + c u^2] dt$$

Тут Q - додатна напіввизначена матриця, $c > 0$, тобто

$$\sum_{i=1}^n q_i x_i^2 = [x_1 \dots x_n] \begin{bmatrix} q_1 & \dots & 0 \\ 0 & q_2 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & q_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

Тоді функціональне рівняння Беллмана має вигляд :

$$\min_u \left[x^T Q x + cu^2 + \langle \nabla V(x), Ax + bu \rangle \right] = \min_u \left[x^T Q x + cu^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T (Ax + bu) \right] = 0$$

Після диференціювання отримаємо

$$2cu + b^T \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) = 0$$

Звідки оптимальне керування визначається

$$u = (-2c)^{-1} b^T \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) = (-2c)^{-1} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T b$$

Після виключення із функціонального рівняння отримуємо рівняння Гамільтона – Якобі – Беллмана :

$$x^T Q x + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T A x = \frac{1}{4c} \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T b \right]^2$$

Розв'язок цього рівняння знаходиться у вигляді квадратичної форми:

$$V(x) = x^T k x,$$

де k - квадратна симетрична матриця $(n \times n)$.

Диференціюючи по x отримаємо за правилом векторного диференціювання

$$\frac{\partial V}{\partial x} = kx = \frac{d}{dx} (x^T k x) = 2x^T k$$

Підставляючи дані співвідношення в рівняння Беллмана. Його можна записати у наступному вигляді:

$$x^T (Q + kA + A^T k - kBC^{-1}B^T k) x = 0$$

Звідси виходить, що матриця k повинна задовольняти алгебраїчному рівнянню в матричному вигляді.

$$Q + kA + A^T k - kBC^{-1}B^T k = 0$$

Це рівняння отримало назву алгебраїчного рівняння Ріккати в матричній формі.

Це системи рівнянь, кількість яких дорівнює $\frac{n(n+1)}{2}$.

Ці системи мають багато розв'язків. Але розв'язок, відповідаючий вимогам додатної визначеності один, тобто єдиний.

Приклад I. Визначимо рівняння оптимального регулятора для об'єкту з передаточною функцією виду

$$W(p) = \frac{k_0}{(Tp+1)p} = \frac{x(p)}{u(p)}.$$

Диференціальне рівняння має вид

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \text{де } x_1 = x \quad a = \frac{1}{T}$$

$$\dot{x} = -ax_2 + bu, \quad x_2 = \dot{x} \quad b = \frac{k_0}{T}.$$

Мінімізуємо квадратичний функціонал

$$I = \int_0^{\infty} (\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + cu^2) dt.$$

Функціональне рівняння Беллмана має вид

$$\min_u \left[\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + cu^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} (-dx_2 + bu) \right] = 0.$$

Звідки одержуємо рівняння регулятора

$$u = -\frac{b}{2c} \frac{\partial V}{\partial x_2}.$$

Перетворюючи (3.27), одержуємо

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 - \frac{\partial V}{\partial x_2} ax_2 = \frac{b^2}{4c} \left(\frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^2.$$

Функцію Беллмана будемо шукати у виді

$$V(x_1, x_2) = k_{11}x_1^2 + 2k_{12}x_1x_2 + k_{22}x_2^2.$$

Підставляючи

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + 2(k_{11}x_1 + k_{12}x_2)x_2 - 2d(k_{12}x_1 + k_{22}x_2) = \frac{b^2}{c}(k_{12}x_1 + k_{22}x_2)^2.$$

У підсумку знаходимо нелінійні алгебраїчні рівняння Ріккати, що визначають параметри квадратичної форми $V(x_1, x_2)$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{b^2}{c} k_{12}^2, \\ \alpha_2 + 2k_{12} + 2ak_{22} &= \frac{b^2}{c} k_{22}^2, \\ k_{11} - ak_{12} &= \frac{b^2}{c} k_{12}k_{22} \end{aligned} \right\}.$$

Рішення цих рівнянь дозволяє одержати

$$k_{12} = \frac{\sqrt{\alpha_1 c}}{b}, \quad k_{22} = -\frac{\alpha c}{b^2} + \sqrt{\frac{\alpha^2 c^2}{b^4} + \frac{(2k_{12} + \alpha_2)c}{b^2}}.$$

У підсумку закон керування з урахуванням (3.30)

$$u = -\frac{b}{c}(k_{12}x_1 + k_{22}x_2),$$

або

$$u = -\left[\sqrt{\frac{\alpha_1}{c}}x_1 + \left(-\frac{\alpha}{b}\right) + \sqrt{\frac{\alpha^2}{b^2} + \frac{2k_{12} + \alpha_2}{c}}x_2 \right].$$

2.2.5. Вибір вагових констант критерію оптимальності.

Пропонується наступний підхід, аналогічний методу масштабування викладений в [8]. Вагові константи знаходяться наступним співвідношенням.

$$\alpha_i = \left(\frac{1}{x_{i\max}} \right)^2, \quad c = \left(\frac{1}{u_{\max}} \right)^2,$$

в яких α_i і c зв'язані з максимально допустимим значеннями фазових координат і керуючого впливу під час перехідного процесу.

$$I = \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{x_1}{x_{1\max}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{x_{n\max}} \right)^2 + \left(\frac{u}{u_{\max}} \right)^2 \right] dt$$

Цей вибір визначається технічними умовами і вимогами до проектованої системи.

Приклад 2. Динаміка керованого об'єкта описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = bu$$

Задано початкові умови

$$x_1(0) = x_{10}, \quad x_2(0) = x_{20}$$

Функціонал якості має вид

$$\min_u I = \int_0^{\infty} (\alpha_1 x_1^2 + cu^2) dt$$

Для системи і функціонала одержимо

$$\min_u \left[\alpha_1 x_1^2 + cu^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} bu \right] = 0$$

Процедура мінімізації дозволяє одержати рівняння

$$u = -\frac{b}{2c} \frac{\partial V}{\partial x_2} = -\frac{b}{c} (k_{12}x_1 + k_{22}x_2)$$

Система рівнянь Ріккаті має вид

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{b}{2c} k_{12}^2, \\ 2k_{12} &= \frac{b}{c} k_{22}^2, \\ k_{11} &= \frac{b^2}{c} k_{12}k_{22} \end{aligned} \right\}$$

У підсумку рішення отримаємо

$$k_{12} = \frac{1}{b} \sqrt{\alpha c}, \quad k_{22} = \frac{1}{b} \sqrt{2k_{12}c}$$

Знайдемо вагові константи α і c відповідно до методики, викладеної раніше. Нехай граничне значення x і u в період перехідного процесу рівні

$$x_{\max} = 0,1 \text{ рад}, \quad u_{\max} = 0,5 \text{ рад},$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{x_{\max}^2} = 100; \quad c = \frac{1}{u_{\max}^2} = \frac{1}{0,5^2} = 4;$$

$$u = - \left(\sqrt{\frac{\alpha}{c}} x_1 + \sqrt{\frac{2k_{12}}{c}} x_2 \right) = -(5x_1 + 3,17x_2).$$

Замикаючи систему через регулятор, одержуємо

$$\ddot{x} + 3,17 \dot{x} + 5x = 0, \quad \omega = 2,24,$$

$$\ddot{x} + 2\xi\omega \dot{x} + \omega^2 x = 0, \quad \xi = 0,69$$

2.2.6. Нелінійні задачі аналітичного конструювання регуляторів

Побудова релейного регулятора.

Розглянемо детальніше задачу обліку обмеження на керування.

Задано систему диференціальних рівнянь

$$\dot{x}_i = f_i(x, u)$$

Задано граничні умови, початкові умови

$$x_1(0), \dots, x_n(0), x_1(\infty), \dots, x_n(\infty)$$

і критерій оптимальності

$$\min_u I = \int_0^\infty [W(x) + \omega(u)] dt$$

Нехай на керування накладене обмеження $-1 \leq u \leq 1$

Врахуємо його при побудові мінімізованого функціоналу так, щоб одержати релейне керування

$$\omega(u) = u^{2q}, \quad |u| \leq 1$$

Графік цієї функції зображений на рис. 2.6.

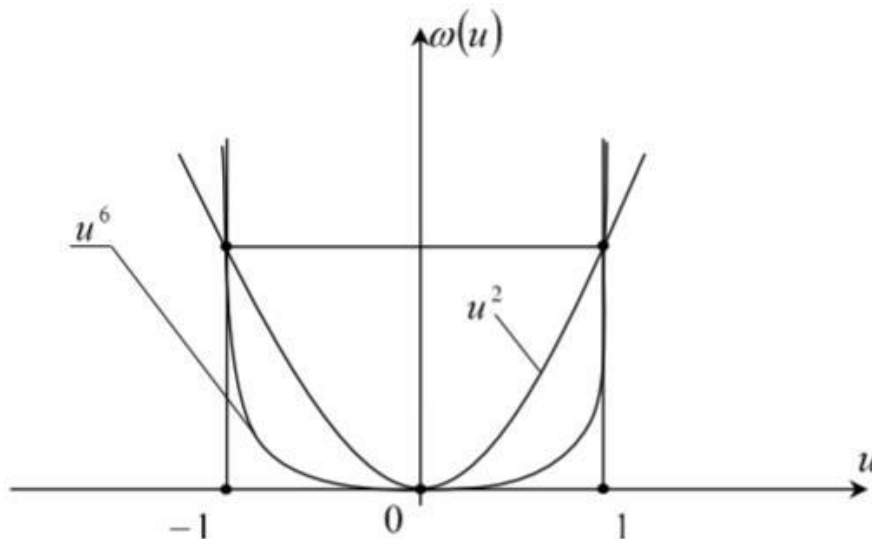


Рисунок 2.6. Графічне зображення мінімізованого функціоналу (релейного керування)

Тоді при досить великих значеннях q (в межі $q \rightarrow \infty$) можна одержати клас релейних керувань. Можна дати наступне пояснення доведення вибору підінтегральної функції $\omega(u) = u^{2q}$. Находимо її як функцію штрафу. Тоді за час перехідного процесу на існування керованої дії u при $|u| > 1$ буде накладатися великий штраф, а знаходження u в малому, тоді при $|u| < 1$, майже не штрафується. В наслідок для реалізації мінімального значення функціоналу керованої дії не повинно перевищувати значення $u = 1$, регулятор буде функціонувати в релейному режимі.

Функціональне рівняння Белмана має вигляд

$$\min_u \left[W(x) + u^{2q} + \langle \nabla V(x), f(x, u) \rangle \right] = 0$$

Після диференціювання отримуємо співвідношення виду

$$2qu^{2q-1} + \langle \nabla V(x), \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \rangle = 0$$

Звідки одержуємо рівняння регулятора

$$u = -\frac{1}{2q} \frac{\langle \nabla V(x), \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \rangle}{u^{2q-1}}$$

Графік співвідношення показаний на рис.2.7

Таким чином керування визначаємо на класі релейних або кусочно – неперервних функцій (рис.2.8)

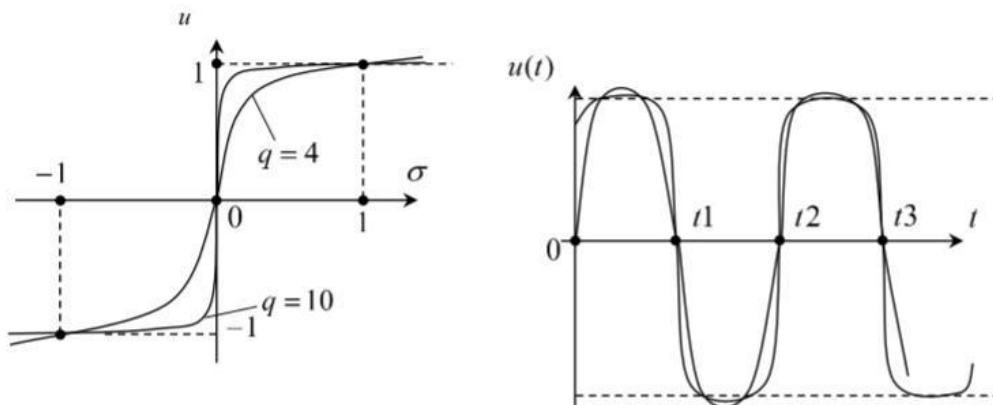


Рис.2.7 Рис.2.8

Розглянемо цю процедуру на конкретному прикладі.

Розглянемо цю процедуру на конкретному прикладі.

Приклад.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad ; \quad \dot{x}_2 = ku.$$

Задані початкові умови, граничні умови

$$x_1(0), \dots, x_n(0) \quad x_1(\infty) = \dots x_n(\infty) = 0,$$

і функціонал

$$I = \int_0^{\infty} [W(x) + \omega(u)] dt,$$

де

$$W(x_1, x_2) = \alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2, \quad \omega(u) = u^{2q}.$$

Функціональне рівняння

$$\min_u \left[\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + u^{2q} + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} k u \right] = 0$$

Звідси одержуємо закон керування :

$$2qu^{2q-1} + k \frac{\partial V}{\partial x_2} = 0$$

і після перетворень

$$u = -\left(\frac{k}{2q} \cdot \frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^{\frac{1}{2q-1}} = -\sqrt[2q-1]{\frac{k}{2q} \frac{\partial V(x_1, x_2)}{\partial x_2}}$$

Підставляючи рівняння

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \left(\frac{k}{2q} \cdot \frac{\partial V}{\partial x_2}\right) \frac{2q}{2q-1} - \left(k \frac{\partial V}{\partial x_2}\right) \left(\frac{k}{2q} \frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^{\frac{1}{2q-1}} = 0$$

Після деяких перетворень одержимо

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \left[\left(\frac{1}{2q}\right)^{\frac{2q}{2q-1}} \left(\frac{1}{2q}\right)^{\frac{1}{2q-1}}\right] \left(k \frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^{\frac{2q}{2q-1}} =$$

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 - \left(\frac{1}{2q}\right)^{\frac{1}{2q-1}} \left[1 - \frac{1}{2q}\right] \left(k \frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^{\frac{2q}{2q-1}} = 0$$

Остаточно одержуємо

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 = \left(\frac{1}{2q}\right)^{\frac{1}{2q-1}} \left[1 - \frac{1}{2q}\right] \left(k \frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^{\frac{2q}{2q-1}}$$

Спрямовуючи $q \rightarrow \infty$ одержуємо $F(q) \rightarrow 1$ і в підсумку граничного переходу

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 = \left| k \frac{\partial V}{\partial x_2} \right|$$

Звідси два рівняння Беллмана. Перше на них визначає $u = \gamma(x_1, x_2)$ на класі, гладких екстремалей, а друге - на класі кусочно-безупинних екстремалей

(тобто керувань), так як

$$u = -\operatorname{sign}\left(k \frac{\partial V}{\partial x_2}\right) \quad \text{при } q \rightarrow \infty.$$

Для другого рівняння точне рішення одержали для систем першого і другого порядку, а рівняння (4.11) дозволяє знайти наближене рішення для систем довільного порядку.

Це викликано тим, що праву частину рівняння Беллмана для гладких функцій можна легко розкласти в ланцюговий дріб і здійснити наближене рішення.

Далі одержуємо рівняння виду:

$$W(x) + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 = \frac{\mu_{11} \left(\frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^2 + \mu_{12} \left(\frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^4 + \mu_{13} \left(\frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^6 + \dots}{1 + \mu_{21} \left(\frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^2 + \mu_{22} \left(\frac{\partial V}{\partial x_2}\right)^4 + \dots}.$$

Розв'язок цього рівняння знаходиться в виді послідовності степеневих форм $V(x) = v^2(x) + v^4(x) + \dots$.

2.3. Синтез близького до оптимального регулятора, що забезпечує мінімум динамічної помилки при керування.

Оскільки електропривод на базі вентильного двигуна наближається за характеристиками до двигуна постійного струму, використаємо математичну модель контуру швидкості у вигляді коливальної ланки, що є коректним при використанні ПІ – регулятора струму, що формує момент, та ПІ – регулятора швидкості.

При аналізі контуру положення можна визначити, що на динаміку відпрацювання переміщення приводом пили впливає люфт виконавчого механізму, особливо під час повертання пили у вихідне положення, на обмеження на швидкість, що має місце оскільки двигун працює на

максимальних обертах. Виходячи з цього структурна схема електроприводу пили має вигляд:

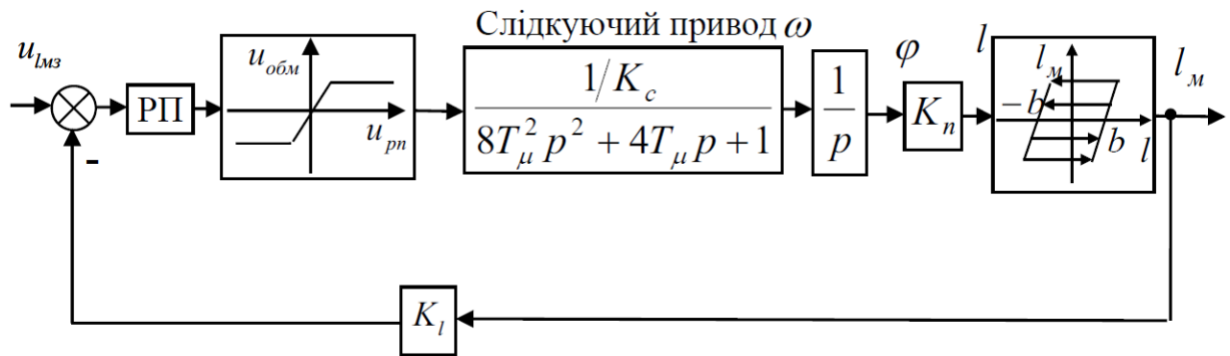


Рисунок 2.1. Структурна схема контуру регулювання переміщення механізму із врахуванням «люфту» та «обмеження на швидкість».

На рис. введені наступні позначення: $u_{лмз}$ - завдання лінійного переміщення пили; u_{pn} - керуючий сигнал регулятора переміщення; $u_{обм}$ - керуючий сигнал регулятора переміщення із врахуванням обмеження; ω - швидкість обертання; φ - кут обертання валу слідкуючого електроприводу; l - лінійне переміщення пили; l_m - лінійне переміщення пили із врахування «люфту»; $K_{ш}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю; T_μ - стала часу перетворювача; K_l - коефіцієнт зворотного зв'язку за переміщенням; K_n - коефіцієнт механічної передачі; РП - регулятор переміщення; b - величина люфту виконавчого механізму.

Оскільки основною вимогою до цієї системи електроприводу є динамічна точність, доцільно використати для синтезу системи керування процедуру аналітичного конструювання регуляторів.

Недоліком процедури аналітичного конструювання є можливість синтезу тільки для лінійних систем та квадратичного функціоналу якості, при якому обмежується середньоквадратична похибка на змінні стану системи. В нашому випадку система є суттєво нелінійною та містить неоднозначну нелінійність, в якій одному значенню аргументу відповідають декілька значень функції.

Сформуємо функціонал якості, який повинен мінімізувати бажаний регулятор переміщення:

$$J = \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{x_1}{x_{1\max}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{x_{n\max}} \right)^2 + \left(\frac{u}{u_{\max}} \right)^2 \right] dt ,$$

де x_1, x_n, u - змінні стану системи та керуючий вплив; $x_{1\max}, x_{n\max}$ - максимальні значення змінних стану та керуючого впливу.

Використовуючи модель люфта, представлену в роботі, можна перейти від неоднозначної до однозначної нелінійності. При цьому «люфт» представляється функцією:

$$l_m = l - b \cdot \text{sign}\left(\frac{dl_m}{dt}\right)$$

Переходячи від структурної схеми до системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку контуру керування положенням, отримуємо:

$$\begin{cases} l_m = l - b \cdot \text{sign}\left(\frac{dl_m}{dt}\right); \\ l = K_{\Pi} \varphi; \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{8T_{\mu}^2} \omega - \frac{1}{2T_{\mu}} \varepsilon + \frac{1}{8K_u T_{\mu}^2} u_{обм} \end{cases}$$

Для здійснення процедур синтезу замінимо нелінійність сигнатурного типу та насичення на функції:

$$\text{sign}\left(\frac{dl_m}{dt}\right) \approx K_{\text{лін}} \left(\frac{dl_m}{dt}\right) \cdot \frac{dl_m}{dt}, \quad u_{обм} = \text{sat}(u_{pn}) = K_{\text{лін}}(u_{pn}) \cdot u_{pn}$$

$$K_{\text{лін}}\left(\frac{dl_m}{dt}\right)$$

- коефіцієнт лінеаризації, що залежить від зміни переміщення виконавчого механізму;

$K_{\text{лін}}(u_{pn})$ - коефіцієнт лінеаризації, що залежить від сигналу керування за переміщенням.

Враховуючи таку апроксимацію система рівнянь, що описує динаміку приводу переміщення запишеться:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dl_m}{dt} = \frac{1}{K_{\text{лін}}(\frac{dl_m}{dt})} \left(\frac{l_m - l}{b} \right); \\ \frac{dl}{dt} = K_{\text{П}} \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{8T_{\mu}^2} \omega - \frac{1}{2T_{\mu}} \varepsilon + \frac{1}{8K_u T_{\mu}^2} K_{\text{лін}}(u_{pn}) u_{pn}. \end{array} \right.$$

При переводі математичної моделі системи в нормальній формі Коші отримуємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{bK_{\text{лін}}(\frac{dl_m}{dt})} (x_1 - x_2); \\ \frac{dx_2}{dt} = K_{\text{П}} x_3; \\ \frac{dx_3}{dt} = -\frac{1}{8T_{\mu}^2} x_3 - \frac{1}{2T_{\mu}} x_4 + \frac{K_{\text{лін}}(u_{pn})}{8K_u T_{\mu}^2} u_{pn}; \\ \frac{dx_4}{dt} = x_4; \end{array} \right.$$

де $x_1 = l_m$, $x_2 = l$, $x_3 = \omega$, $x_4 = \varepsilon$.

Отже, використовуючи процедуру лінеаризації за змінними коефіцієнтами можливо оптимати умовно лінійну математичну модель об'єкта. При цьому квадратичний функціонал якості, що зумовлює обмеження на середньоквадратичну похибку матиме вигляд:

$$J = \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{x_1}{x_{1\max}} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{x_{2\max}} \right)^2 + \left(\frac{x_3}{x_{3\max}} \right)^2 + \left(\frac{x_4}{x_{4\max}} \right)^2 + \left(\frac{u_{pn}}{u_{pn\max}} \right)^2 \right] dt.$$

Використовуючи процедуру синтезу аналітичного конструювання із використанням концепції методу Пірсона, що набула подальшого розвитку в роботах [5],[6] можна отримати квазіоптимальний регулятор переміщення. Ідея цього методу полягає в тому, що в кожний момент часу вирішується задача аналітичного конструювання оптимального регулятора для лінійної моделі і квадратичного функціоналу якості. Така задача може бути вирішена на базі програмованого логічного контролера з урахуванням можливості вимірювання кожної із сталих стану. При цьому в контролері оброблюється сигнал із датчика пили, а саме магнітної стрічки, вимірюється

швидкість зміни переміщення та обчислюються $K_{\text{лін}} \left(\frac{dl_m}{dt} \right)$ та $K_{\text{лін}}(u_{pn})$.

Ця бібліотека досить просто реалізується на контролері із можливістю програмування на текстових мовах програмування. Досить складною задачею є задача обчислення коефіцієнтів регулятора із системи нелінійних алгебраїчних рівнянь Ріккаті. Тому, в роботах [5], [6] запропонована модернізація квадратичного функціоналу якості та введенням обмеження на оптимальне керування:

$$J = \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{x_1}{x_{1\max}} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{x_{2\max}} \right)^2 + \left(\frac{x_3}{x_{3\max}} \right)^2 + \left(\frac{x_4}{x_{4\max}} \right)^2 + \left(\frac{u_{pn}}{u_{pn\max}} \right)^2 + \left(\frac{u_{оптум}}{u_{оптум\max}} \right)^2 \right] dt.$$

Це не призводить до якісної зміни алгоритму керування, проте дає можливість вирішувати не систему нелінійних рівнянь Ріккаті, а алгебраїчну систему рівнянь. При використанні середовища програмування Codesys 3.5 вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь можливо за допомогою бібліотеки Ocat32.

Практична реалізація запропонованої системи керування можлива на базі програмованого логічного контролера від компанії lenze L-force 3200с, датчика лінійного переміщення із інтерфейсом CAN, та підтримкою протоколу CANopen та сервоперетворювача Lenze 8400 topline. Підтримка швидкості передачі даних до 1Мб/с та циклу обчислення 1мс забезпечує

достатню швидкодію контуру регулювання переміщення. Функціональна схема такої системи керування представлена на рис.2.2.

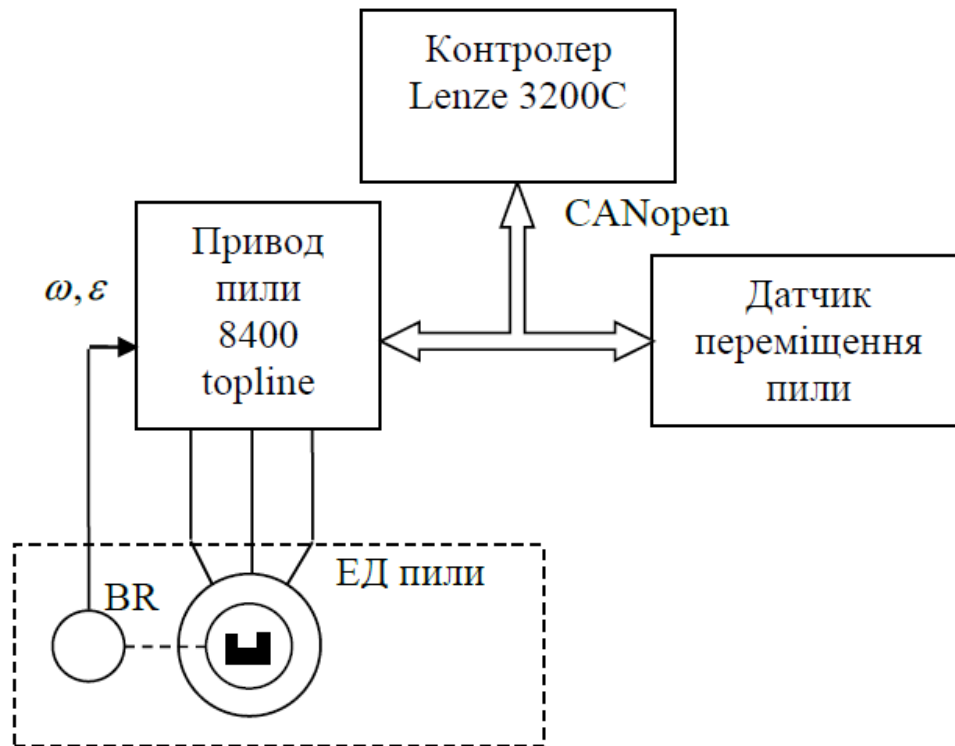


Рисунок 2.2. Функціональна схема запропонованої квазіоптимальної системи керування.

Загальний вигляд алгоритму керування описується формулою:

$$u_{pn} = K_1\left(\frac{dl_m}{dt}, u_{pn}\right) \cdot \Delta l_m + K_2\left(\frac{dl_m}{dt}, u_{pn}\right) \cdot \Delta l + K_3\left(\frac{dl_m}{dt}, u_{pn}\right) \cdot \Delta \omega + K_4\left(\frac{dl_m}{dt}, u_{pn}\right) \cdot \Delta \varepsilon ,$$

де $K_1\left(\frac{dl_m}{dt}, u_{pn}\right), K_2\left(\frac{dl_m}{dt}, u_{pn}\right), K_3\left(\frac{dl_m}{dt}, u_{pn}\right), K_4\left(\frac{dl_m}{dt}, u_{pn}\right)$ - коефіцієнти регулятора,

Δ - визначає відхилення від заданого значення змінної стану.

Дослідження системи керування проводилось із використанням програмного середовища Matlab, та його додатку Simulink. При цьому для спрощення процедури обчислення коефіцієнтів лінеаризації була реалізована функціональна залежність зміни коефіцієнтів квазіоптимального регулятора, отриманих для деякої області зміни

$\frac{dl_m}{dt}$ та u_{pn} , відповідно. Графік перехідних процесів для класичного лінійно – квадратичного регулятора та отриманого квазіоптимального регулятора мають вигляд, представлений на рис.2.3 та на рис.2.4, відповідно.

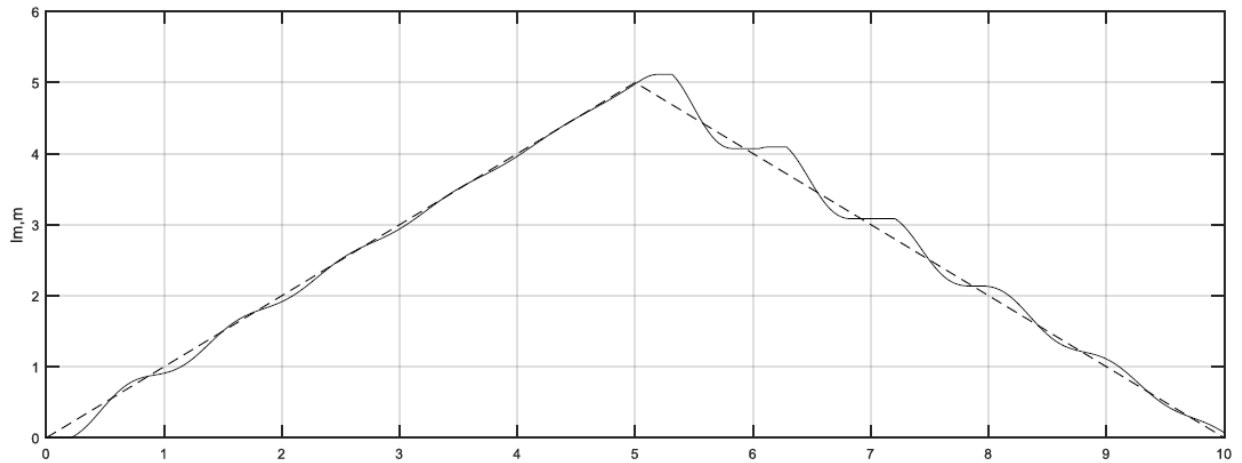


Рисунок 2.3. Графік перехідного процесу за переміщенням «летючої» пили при використанні LQR – регулятора.

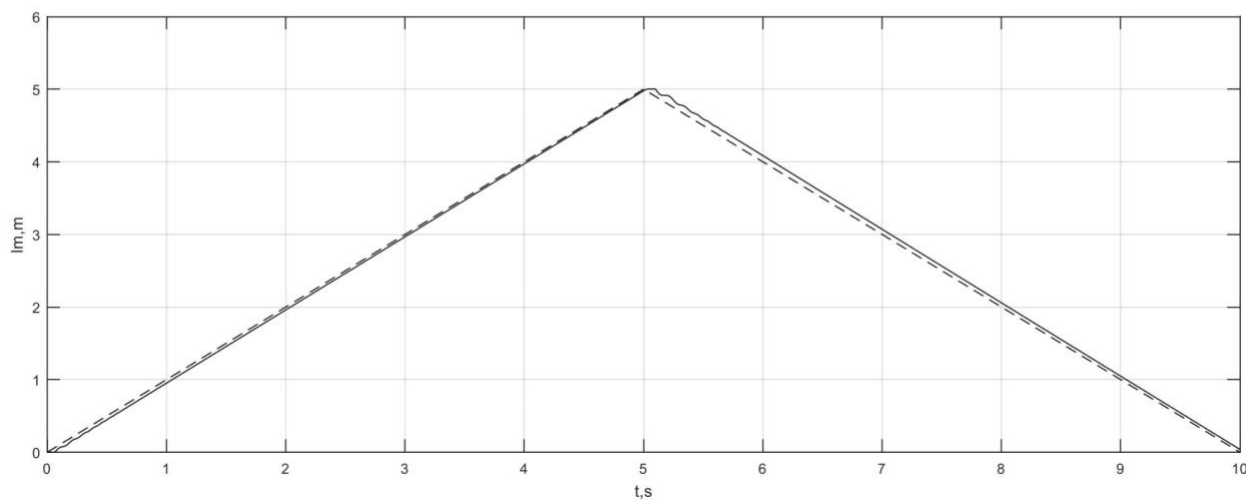


Рисунок 2.4. Графік перехідного процесу за переміщенням «летючої» пили при використанні запропонованого квазіоптимального регулятора.

Слід відзначити, що при моделюванні використовувалось дещо збільшене значення люфту для можливості наглядного представлення працездатності запропонованого алгоритму керування. Сигнал завдання формувався як лінійна функція, що відповідає завданню від зовнішнього контролера, що керує всія технологічним процесом.

Розділ 3. Дослідження статичних та динамічних характеристик системи.

3.1. Вибір перетворювача частоти та двигуна

Здійснимо вибір перетворювача частоти та двигуна за допомогою програмного забезпечення Drive Solution Designer V4.4.0.6.

Перший слайд визначає тип приводного механізму і зображений на рисунку 3.1. Було вибрано лінійний рух, тому що каретка з пилою буде рухатися вздовж прокату труби.

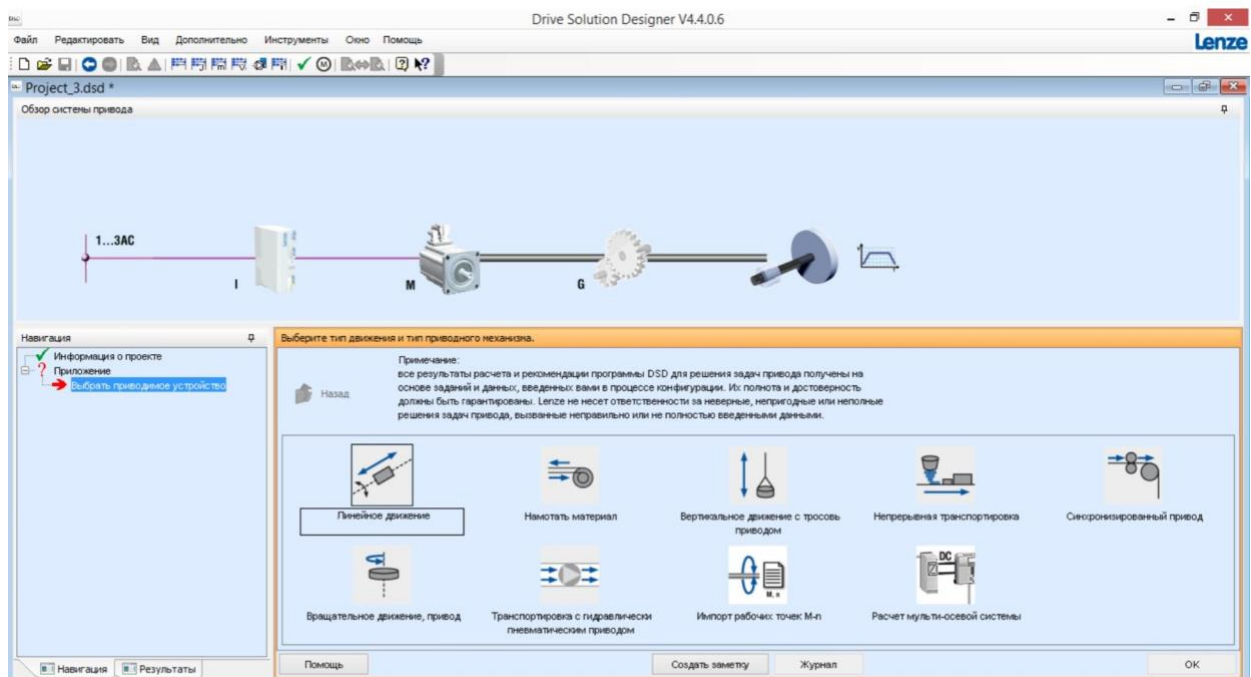


Рисунок 3.1. Тип приводного механизма.

На рисунку 3.2 показаний вибір способу лінійного переміщення у вигляді ремінного механізму:

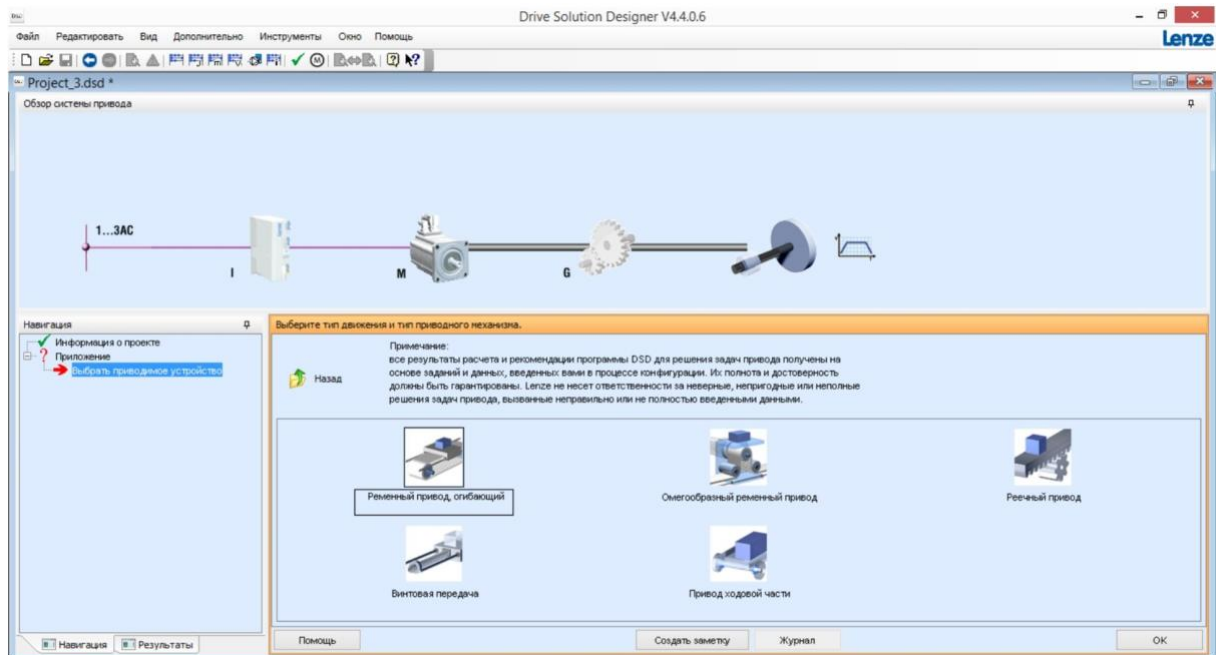


Рисунок 3.2. Вибір способу лінійного переміщення у вигляді ремінного механізму.

На рисунку 3.3 зображено, як задаємо данні приводного пристрою: діаметр шківу, масу салазок, ККД зубчатого ремня. Вказано:

- діаметр шківу $d_{C0q}=160\text{мм}$;
- маса салазок $m_{aux}=175\text{кг}$;
- ККД зубчатого ремня $\eta_{Bl}=0,95$.

Інші дані приводного приладу вказано зі стандартними значеннями, запропонованими програмою.

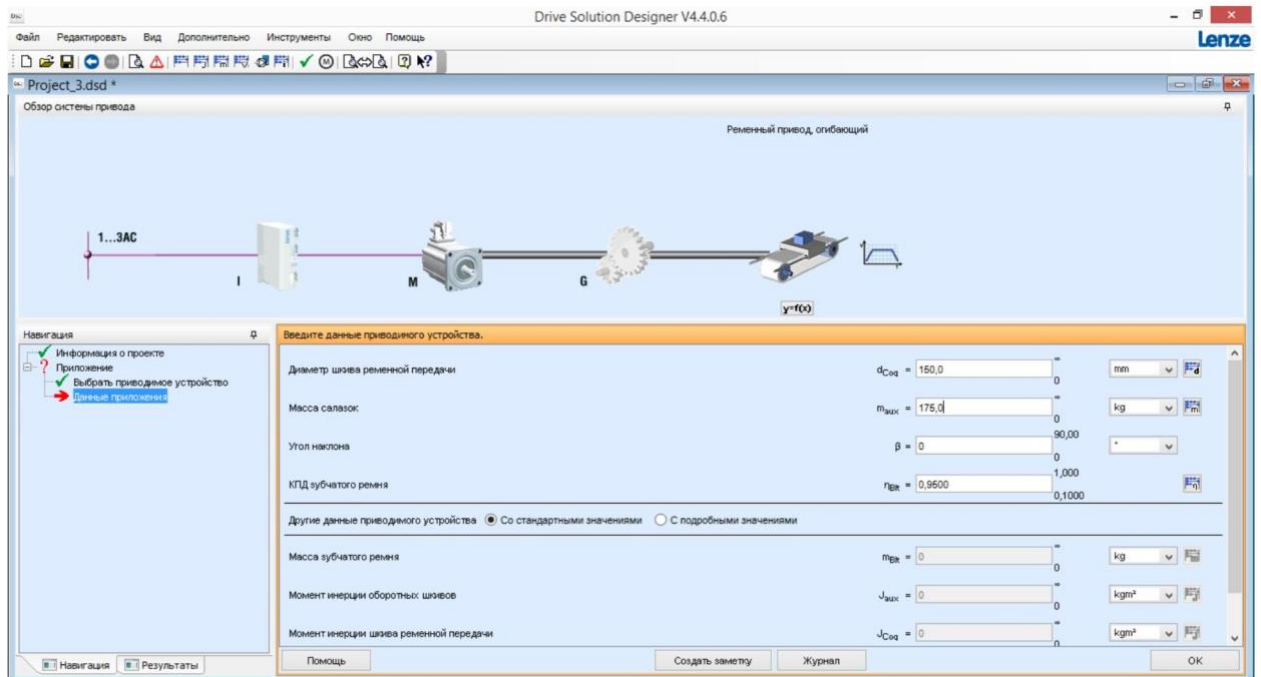


Рисунок 3.3. Дані приводного пристрою.

На рисунку 3.4 зображено вибір способу задання профілю руху:

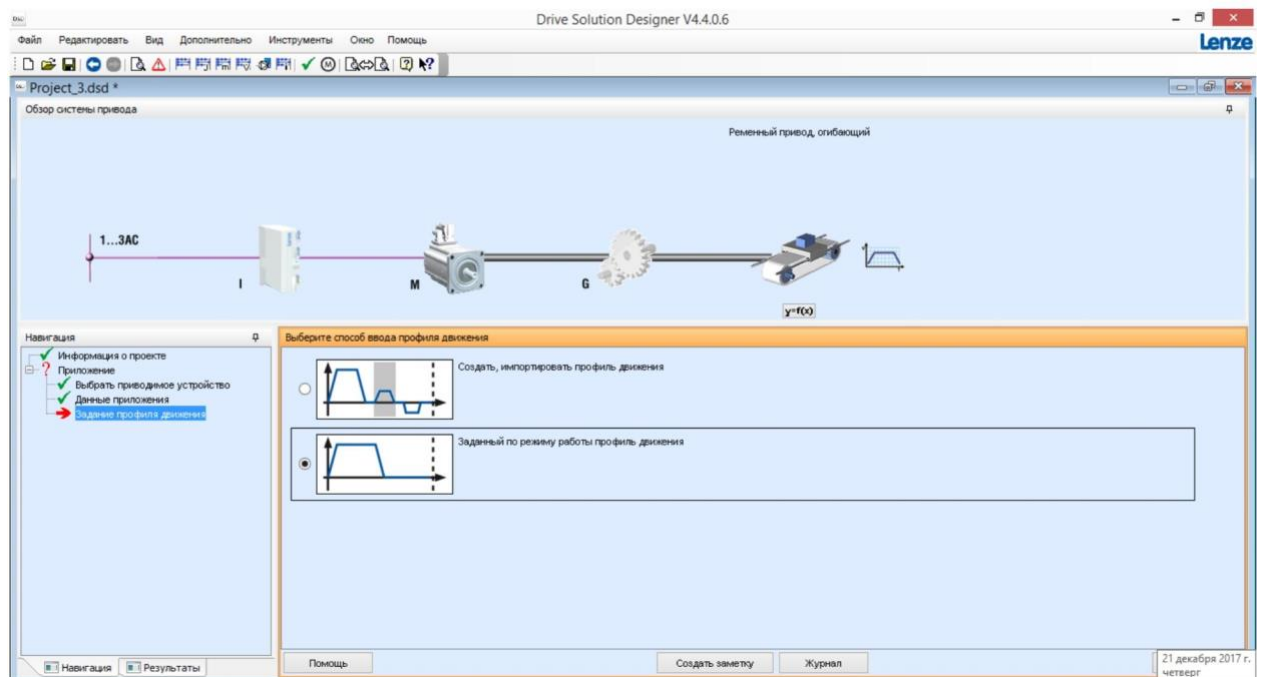


Рисунок 3.4. Вибір способу задання профілю руху.

На рисунку 3.5 показано, як задаємо значення для режиму роботи: максимальну швидкість приводу, силу, яка діє при опусканні пілкового диска, час розгону, уповільнення та всього циклу. Задано:

- максимальна швидкість $v_{\max}=1\text{ м/с}$;
- змінна сила провідного приладу $F_{\text{var,app}}=2000\text{ Н}$;
- час розгону $t_{\text{acc}}=0,2\text{ с}$;
- час сповільнення $t_{\text{dec}}=0,2\text{ с}$;
- тривалість циклу $t=5\text{ с}$.

Також програма підрахувала задані значення та вивела на дисплей початкові характеристики механізму ремінного приводу та електричної мережі.

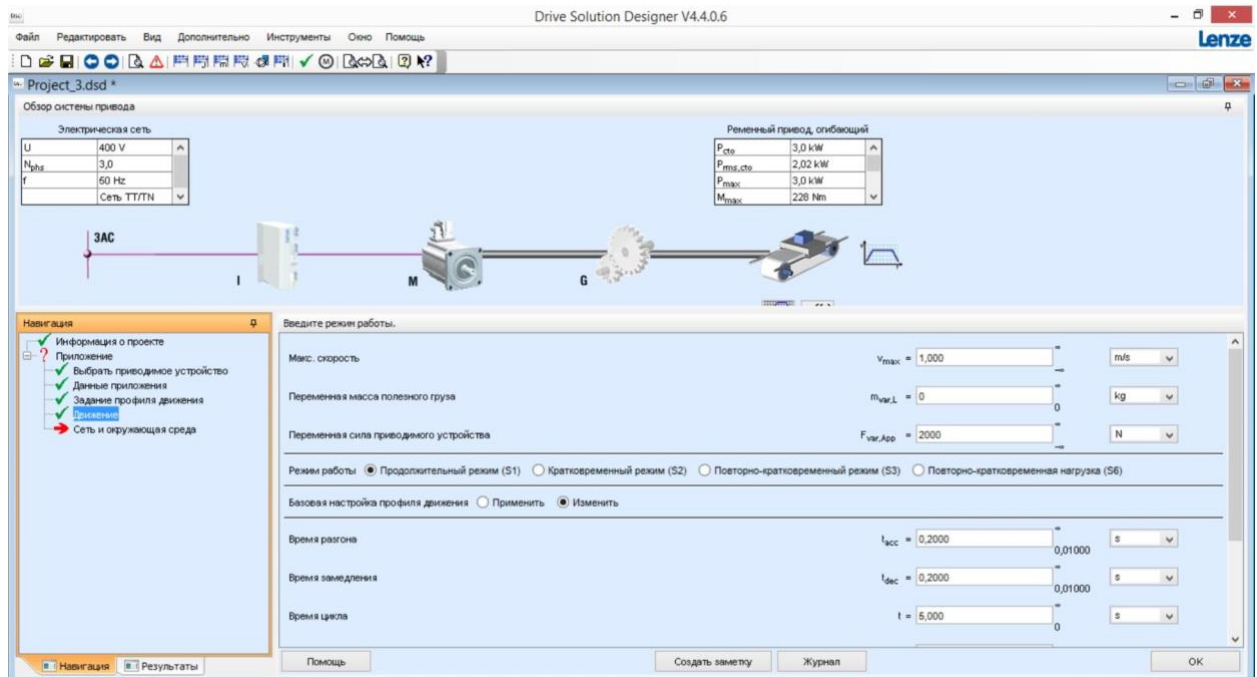


Рисунок 3.5. Значення для режиму роботи.

На рисунку 3.6 показано вибір системи електропостачання та тип мережі, а також задаємо значення навколишнього середовища:

7. Максимальна температура навколишнього середовища двигуна/редуктора $\vartheta_{\text{opt}}=30^{\circ}\text{C}$;

8. Максимальна температура навколишнього середовища перетворювача $\vartheta_{opr}=40^{\circ}\text{C}$;
9. Висота над рівнем моря $h=1000\text{м}$.

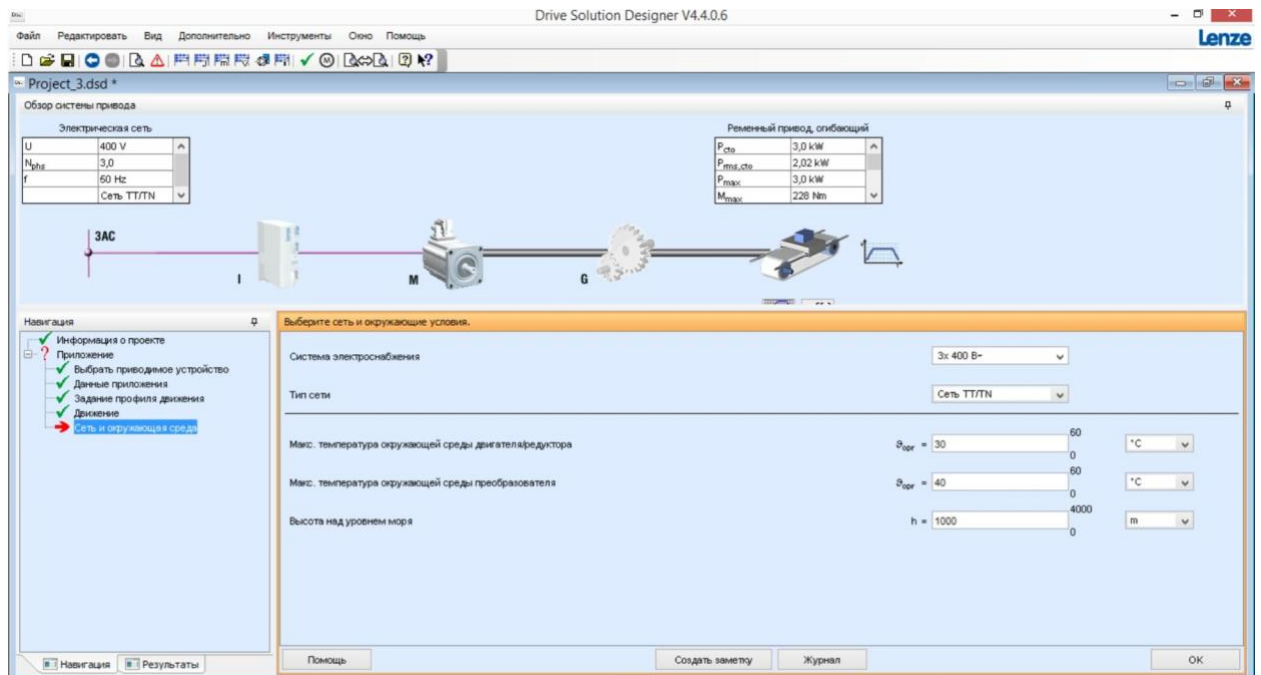


Рисунок 3.6. Вибір системи електропостачання, тип мережі та показники навколишнього середовища.

Рисунок 3.7 показує вибір редуктора та зворотного зв'язку, що здійснюється рекомендаціями програми:

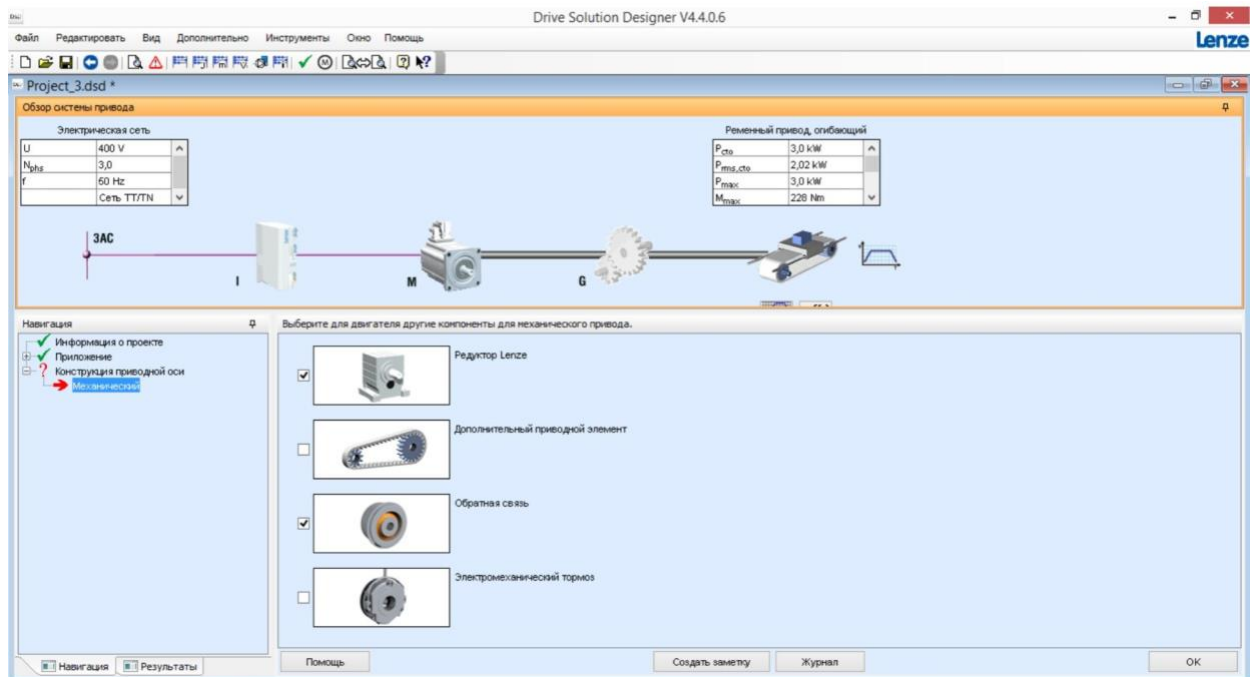


Рисунок 3.7. Вибір редуктора та зворотного зв'язку.

На рисунку 3.8 зображено, вибір електричної концепції електропривода – вибрано перетворювач з живленням від мережі (одноосьовий приводний пристрій).

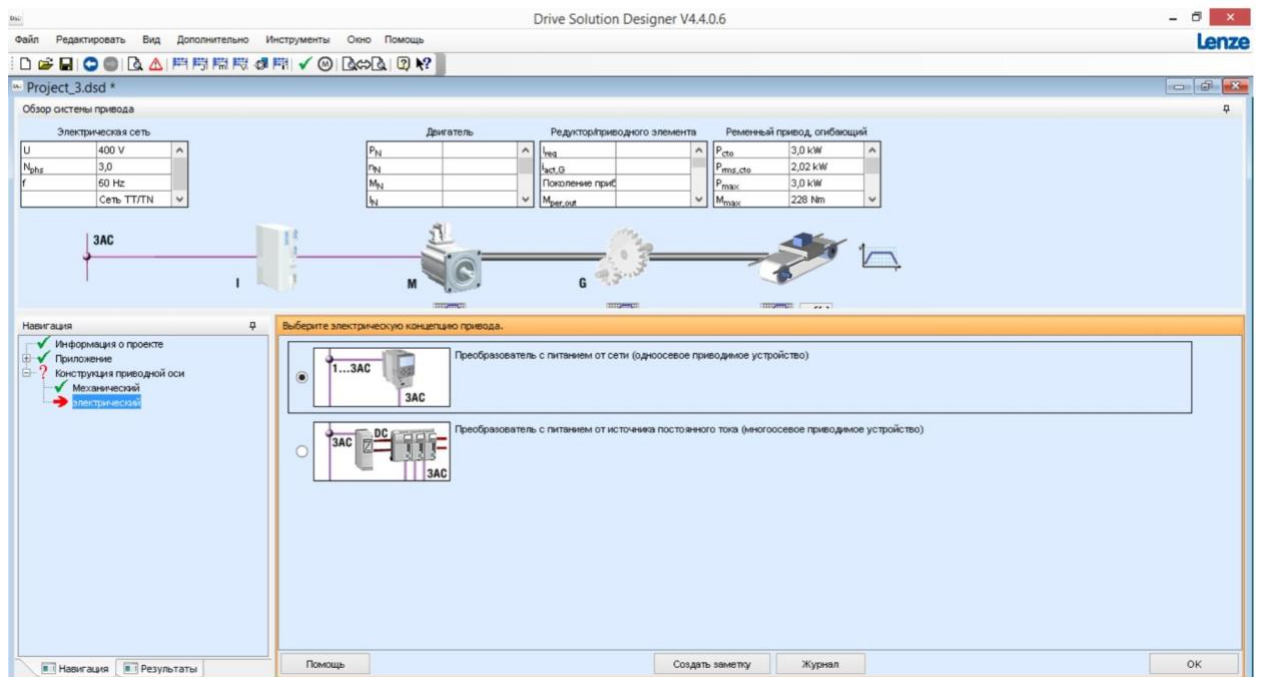


Рисунок 3.8. Вибір електричної концепції електропривода.

Рисунок 3.9 показує вибір концепції приводу:

10. Редуктор серії g500-Н циліндричний;
11. Монтаж редуктора/двигуна – прямой монтаж;
12. Двигун серії MCS;
13. Монтаж двигателя/перетворювача – вбудовані пристрої.

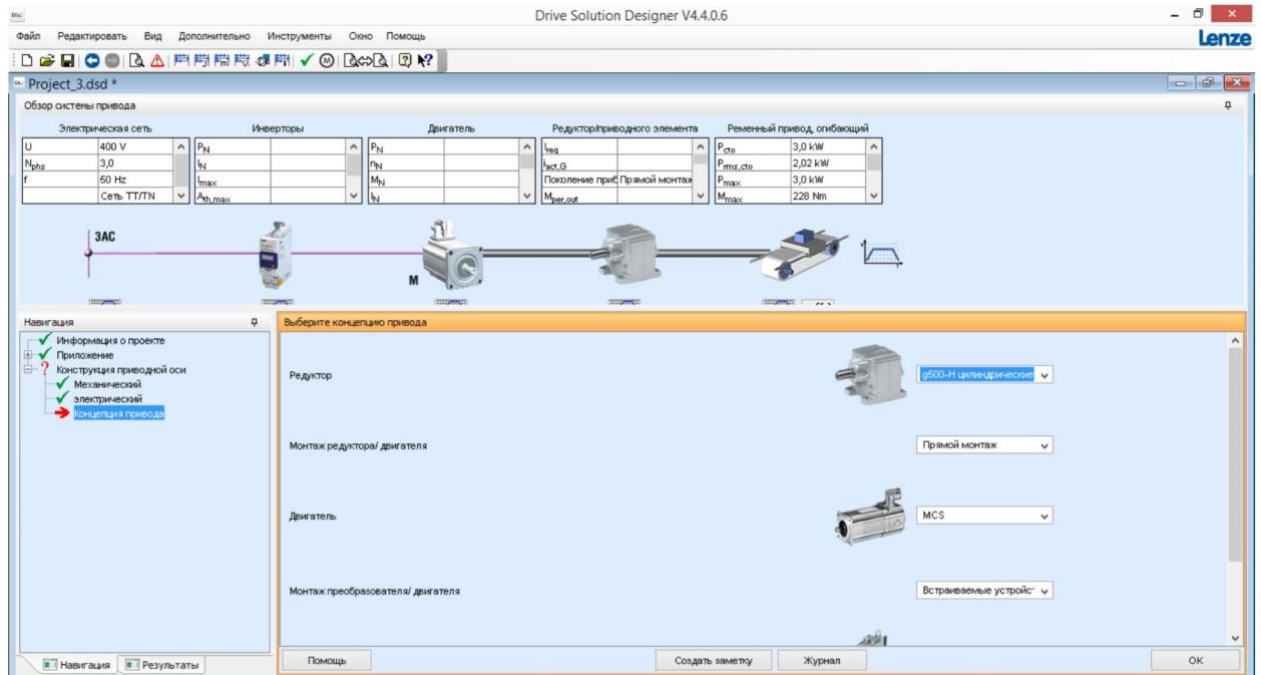


Рисунок 3.9. Вибір концепції приводу.

На рисунку 3.10 зображено вибір середньої тривалості роботи установки за добу, де вказано 12 год.

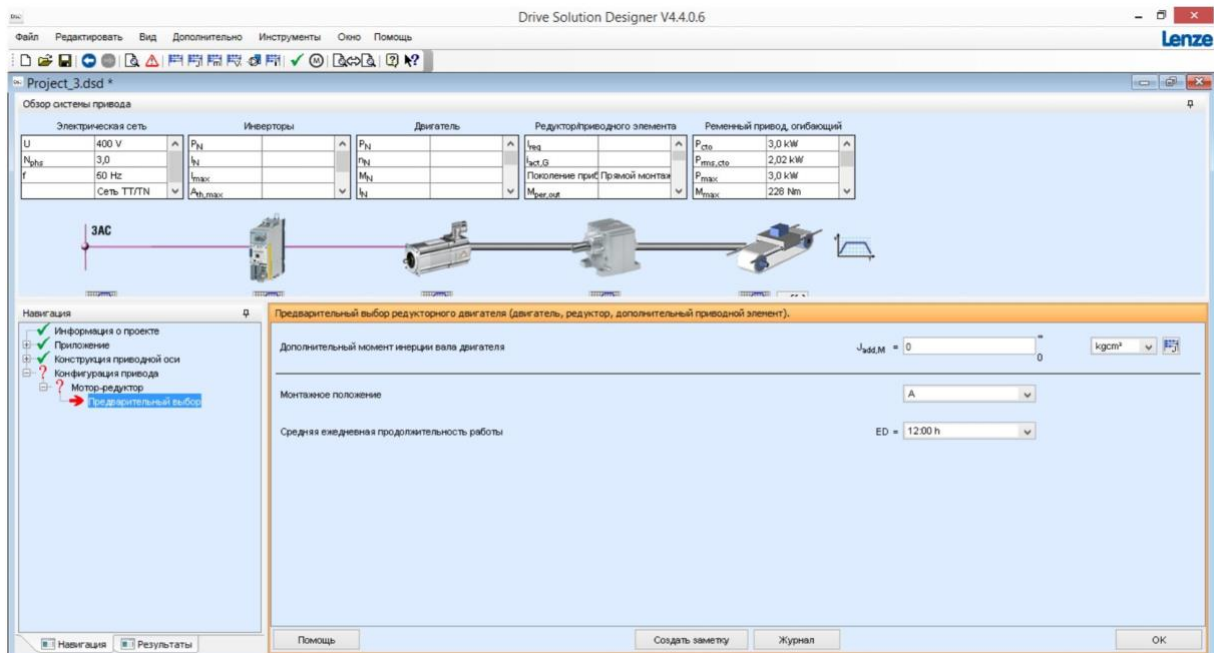


Рисунок 3.10. Вибір середньої тривалості роботи установки.

За рекомендацією ПЗ вибираємо двигун. Це зображено на рисунку 3.11. Як видно з рисунку було вибрано двигун серії MCS типу 12H35 з такими характеристиками:

14. $n_N = 3525$ об/хв;
15. $M_0 = 11,4$ Нм;
16. $M_{\max} = 29$ Нм;
17. $M_N = 7,5$ Нм;
18. $P_N = 2,8$ кВт;
19. $I_N = 5,7$ А;
20. $n_{\max} = 6000$ об/хв;
21. $m = 9,5$ кг.

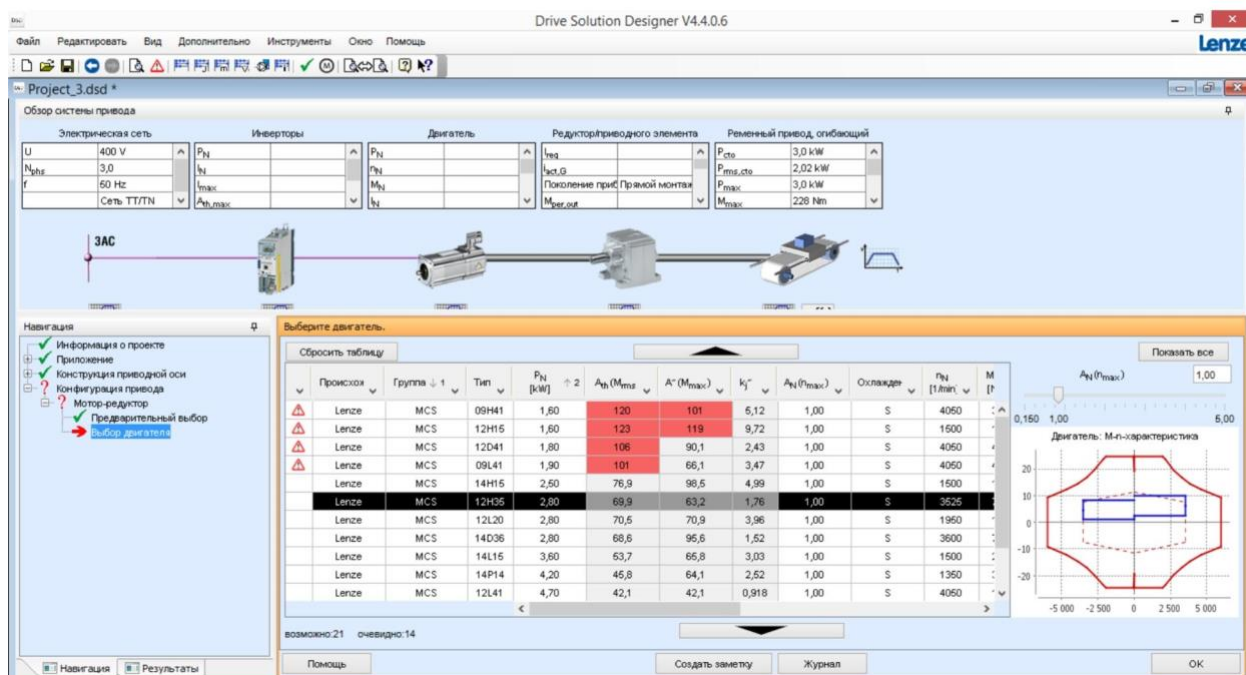


Рисунок 3.11. Вибір двигуна.

Рисунок 3.12 показує вибір редуктора. Вибрано редуктор серії g500-N450.

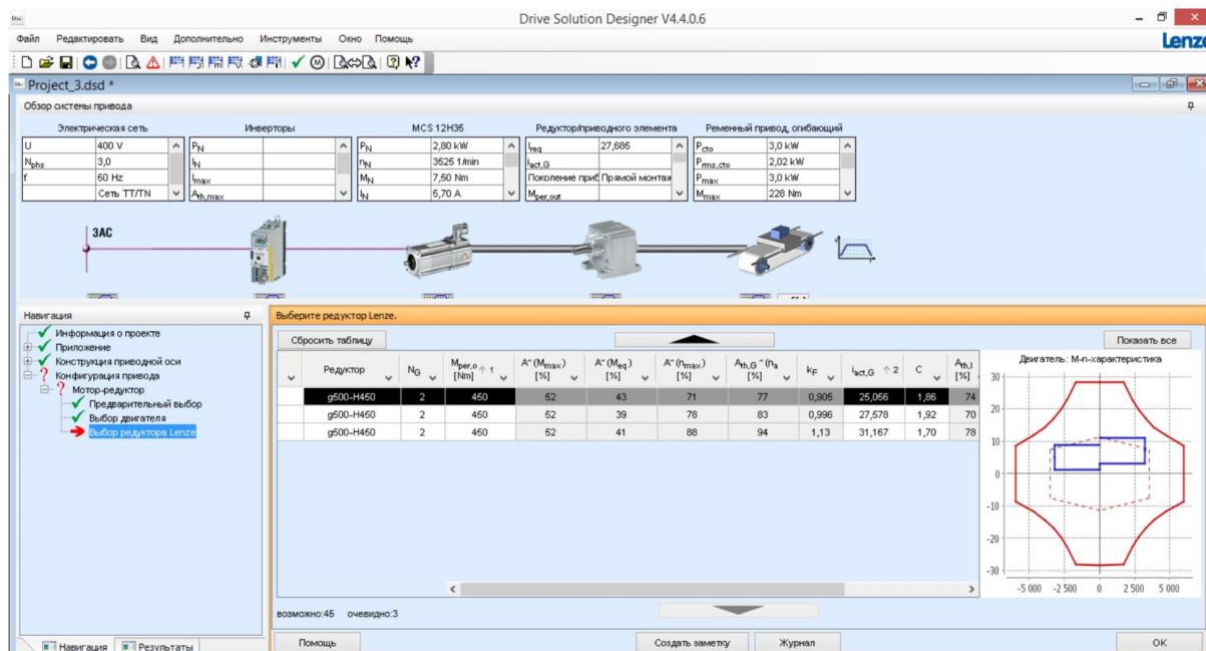


Рисунок 3.12. Вибір редуктора.

На рисунку 3.13 показано як задаємо характерні ознаки перетворювача:

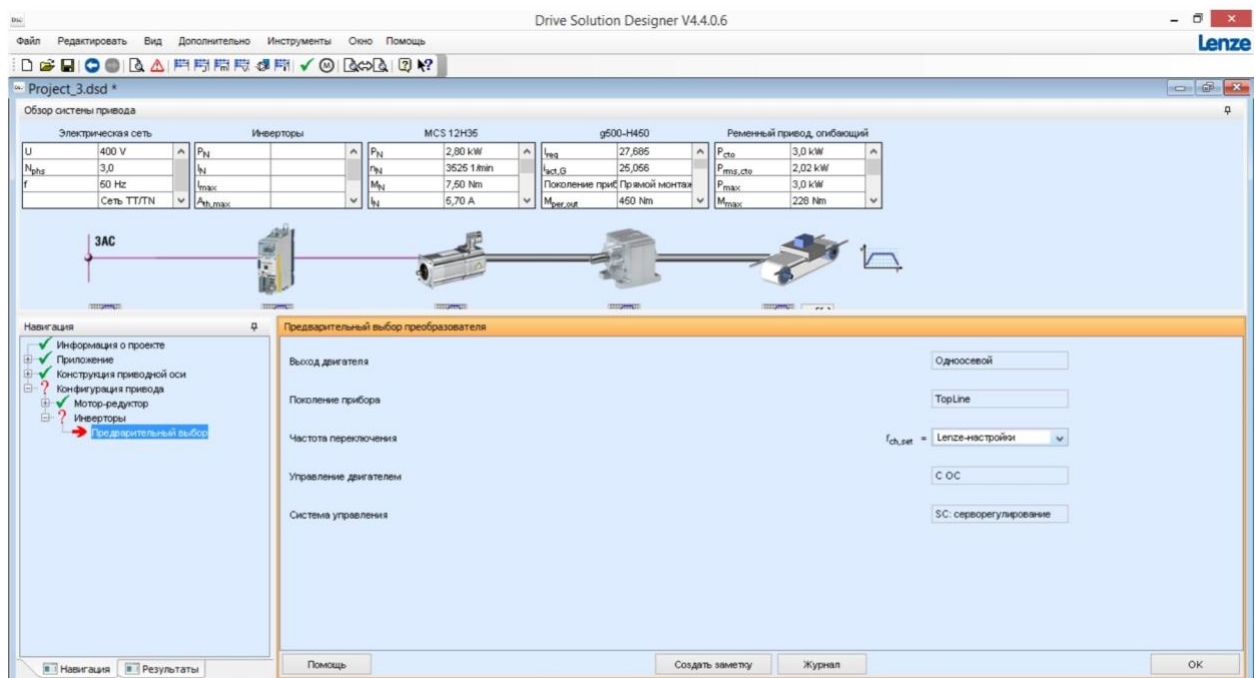


Рисунок 3.13. Попередній вибір перетворювача.

На рисунку 3.14 показаний вибір перетворювача. Вибрано перетворювач типу E84AVTCx3024, у якого $P_N = 3 \text{ кВт}$, $I_N = 7,3 \text{ А}$ та $I_{\text{max}} = 14,6 \text{ А}$

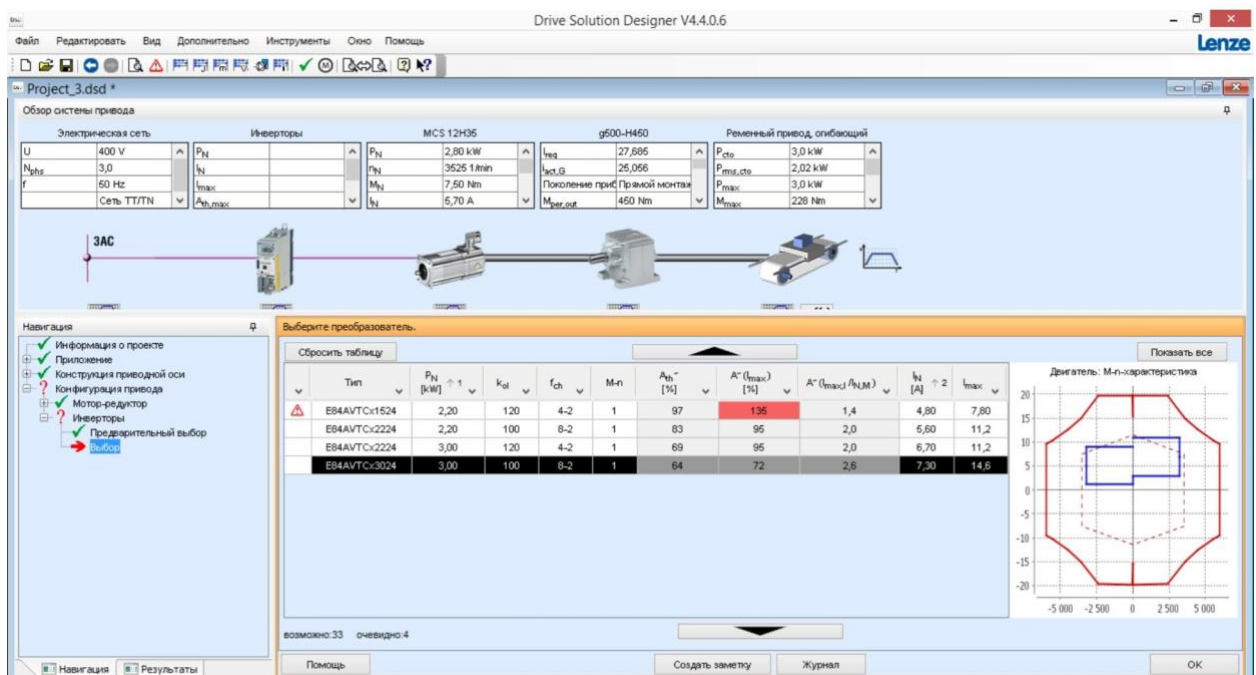


Рисунок 3.14. Вибір перетворювача.

На рисунку 3.15. показаний вибір системи зворотного зв'язку:

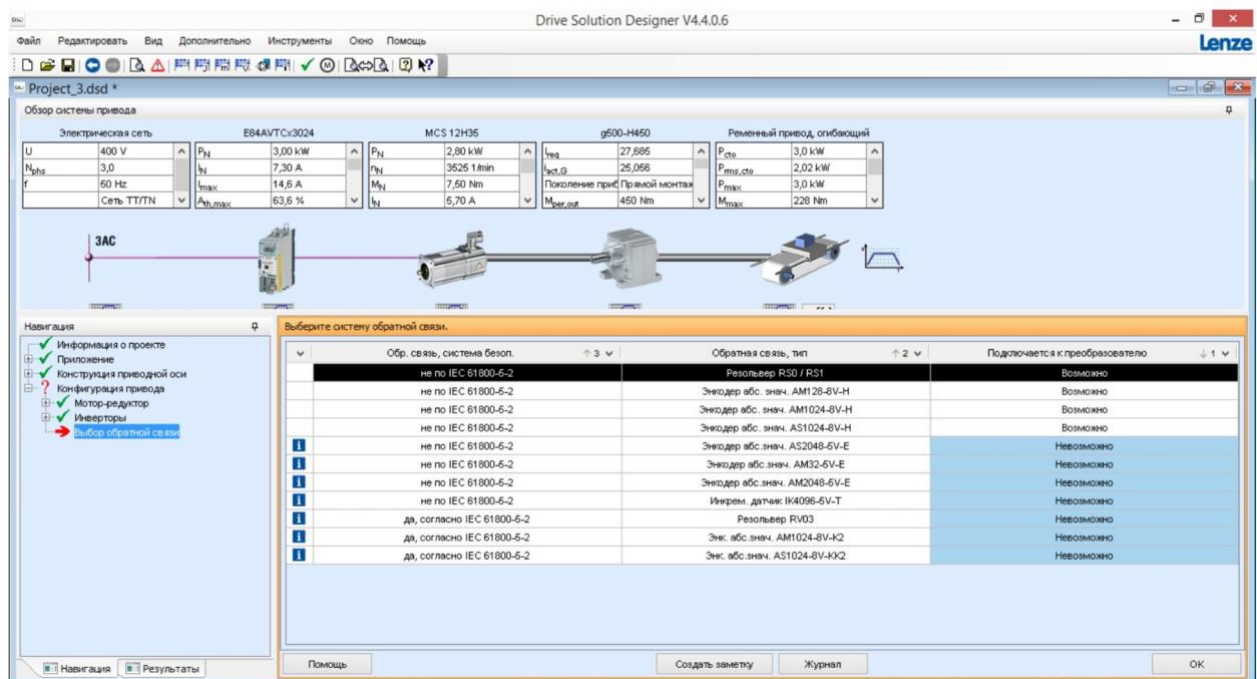


Рисунок 3.15. Вибір системи зворотного зв'язку.

На рисунку 3.16 показано вибір тормозного резистора – резистор типу ERBS082R780W, у якого $P_H = 780$ Вт, $R_B = 82$ Ом, ступінь захисту – IP65.

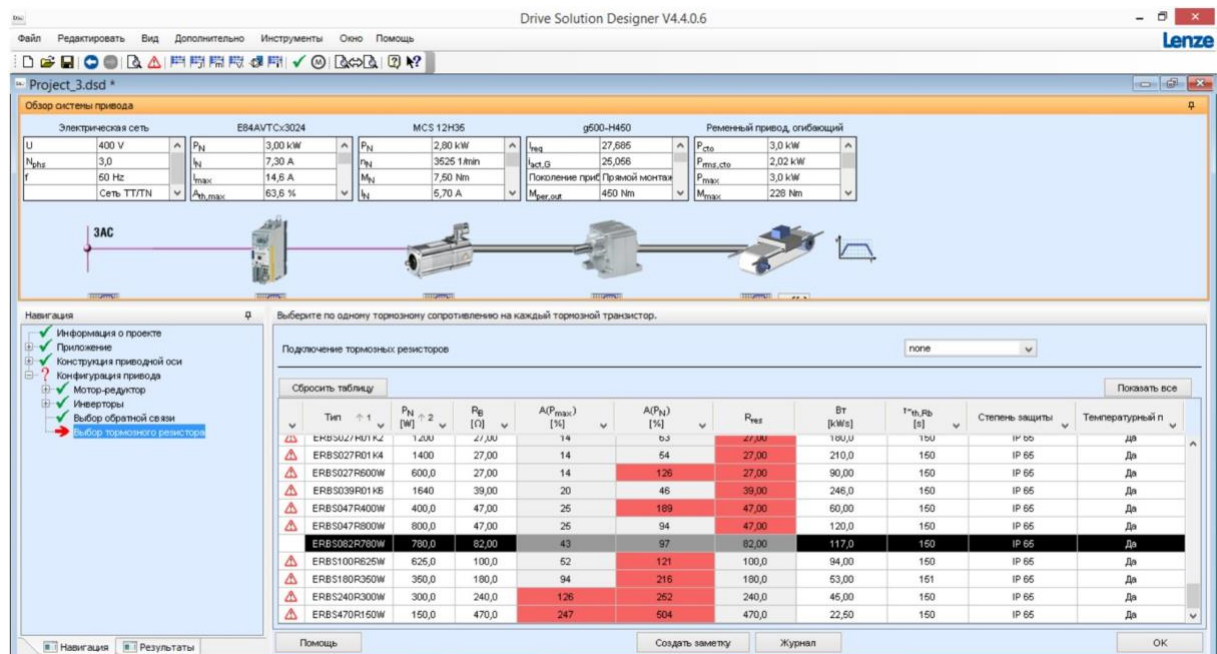


Рисунок 3.16. Вибір тормозного резистора.

3.2. Контроль механізму опускання та піднімання пилкового диска.

До каретки приєднано механізм, який призначений для спуску та підйому пилкового диска, що обертається, для різки труби. Цю властивість буде виконувати пара гідроциліндрів, які керуються поданням стиснутого газу або рідини на клапани. Регулювання подачі рідини виконуватиме пристрій ПЛК від компанії Lenze серії L-force 3200с.

L-force Controller серії 3200 С фірми Lenze має систему введення / виведення 1000 с можливістю підключення до 64 інтелектуальних станцій.

L-force Controller 3200 С має компактну і надійну конструкцію з запасом потужності і безліччю різних функцій. У поєднанні з програмним забезпеченням і вибором модуля в системі вводу / виводу Controller 3200 С надає користувачеві вдале рішення автоматизації і управління різними додатками в технологічному процесі.

Завдяки швидкій шинній структурі і широкого спектру високошвидкісних модулів введення / виведення він підходить для сучасного швидкого вирішення завдань управління приводами. Тому цілком логічно, що компанія Lenze розширила асортимент своєї продукції, щоб включити в неї цю інтелектуальну головну станцію. Члени нового сімейства L-force Controller серії 3200 С мають абсолютно нову архітектуру на базі процесора "Atom", вони були оптимізовані для вирішення абсолютно різних завдань.

Кріплення контролера і модулів вводу / виводу проводиться на DIN рейці, що забезпечує зручність монтажу.

Для збереження налаштувань контролер має гнізда підключення зовнішньої пам'яті SD card (EPCZEMSD3 - 512Mb) і USB flash drive (EPCZEMUS6 - 4Gb).

Живлення контролерів здійснюється від зовнішнього джерела EZV2400-000 (24V 10A).

У колі є два реле RT1 та RT2, які керують своїми контактами, відповідно RT1.1 та RT2.1, RT2.2. При подачі сигналу на контролер, він замикає свій контакт RT2.1 та розмикає – RT2.2. Через контакт RT2.1 струм надходить на реле RT1, яке замикає свій контакт RT1.1, і з'являється напруга на котушках K2.1 та K3.1, які керують клапанами гідроциліндра «на спуск». Після відліку часу RT1 через 1 сек відпускає свій контакт. Тоді у колі клапанів «на спуск» зникає напруга, і гідроциліндр тримає пилку в такому положенні. RT2 через 1,5 сек від початку циклу відмикає RT2.1 та замикає RT2.2, і на котушки K2.2 та K3.2 надходить струм. Клапани «на підйом» спрацьовують, та пилковий диск починає підніматися. Після закінчення циклу контролер відраховує кількість імпульсів, що надходять від енкодера, який приєднано до труби, що рухається.

3.3.Розрахунок коефіцієнтів регуляторів та їх налаштування.

Спроекуємо модель автоматизованої системи електроприводу летючої пили в програмному забезпеченні MATLAB.

Ця система керується трьома зворотними зв'язками: контур струму, контур швидкості та контур положення ротору. Регулятори струму та швидкості – пропорційно-інтегруючі.

Знайдемо коефіцієнти ПІ-регуляторів струму та швидкості:

Еквівалентна стала часу :

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = 1,4 / 1,5 = 0,133$$

Коефіцієнт за моментом:

$$K_M = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{1\text{НОМ}}} = 7,5 / 6,7 = 1,119$$

Стала часу $T_\mu = 0,005$ (для ПЧ):

$$K_{\text{ТП}} = \frac{U_{\text{ТП.маx}}}{U_{\text{К.маx}}} = \frac{U_{1\Phi.\text{НОМ}}}{10} = 220/10 = 22$$

Коефіцієнт передачі ЗЗ за швидкістю:

$$K_{\text{Ш}} = \frac{U_{\text{ОШ.маx}}}{\omega_{\text{маx}}} = \frac{10}{\omega_{\text{НОМ}}} = 10 / 340,55 = 0,029$$

Коефіцієнт передачі ЗЗ за струмом:

$$K_{\text{С}} = \frac{U_{\text{ОС.маx}}}{I_{\text{маx}}} = \frac{10}{M_{\text{маx}} / K_M} = 10 / 24 = 0,42$$

Налаштування ПІ-регулятора струму виконано за допомогою автоматичного налаштування за допомогою ПО. Це зображено на рисунку 3.17:

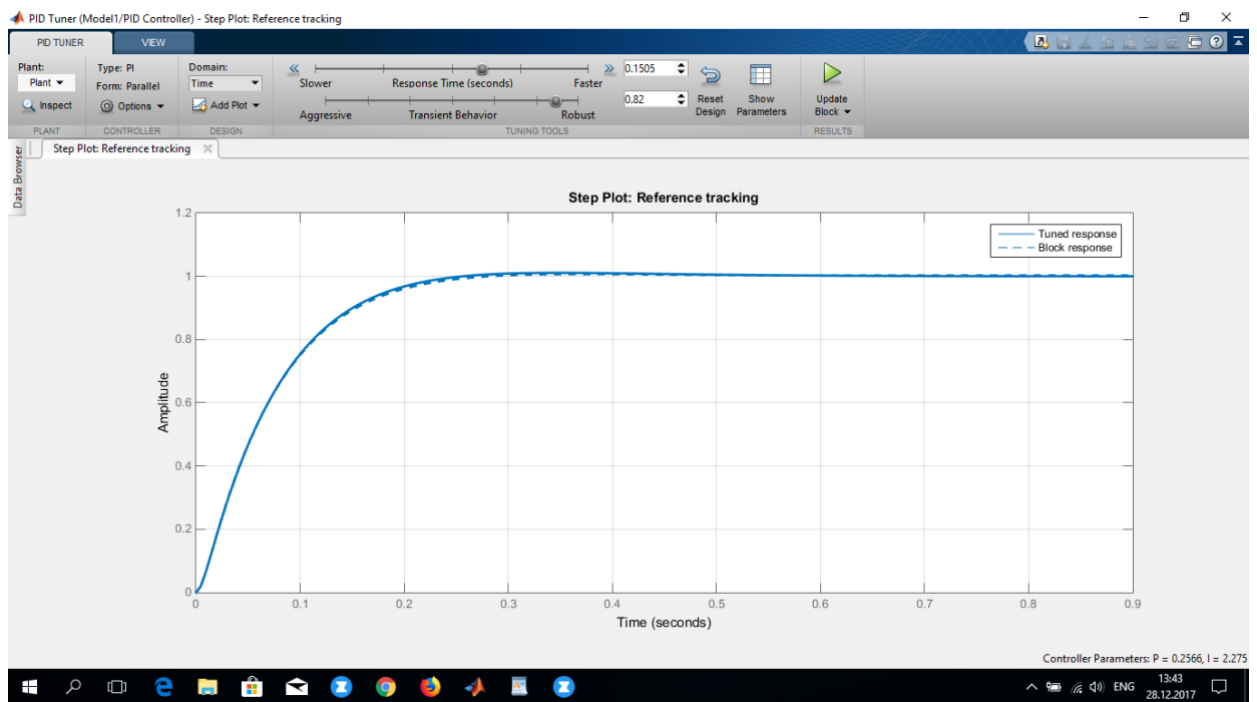


Рисунок 3.17. Налаштування ПІ-регулятора струму.

Графік перехідного процесу представлений на рисунку 3.18:

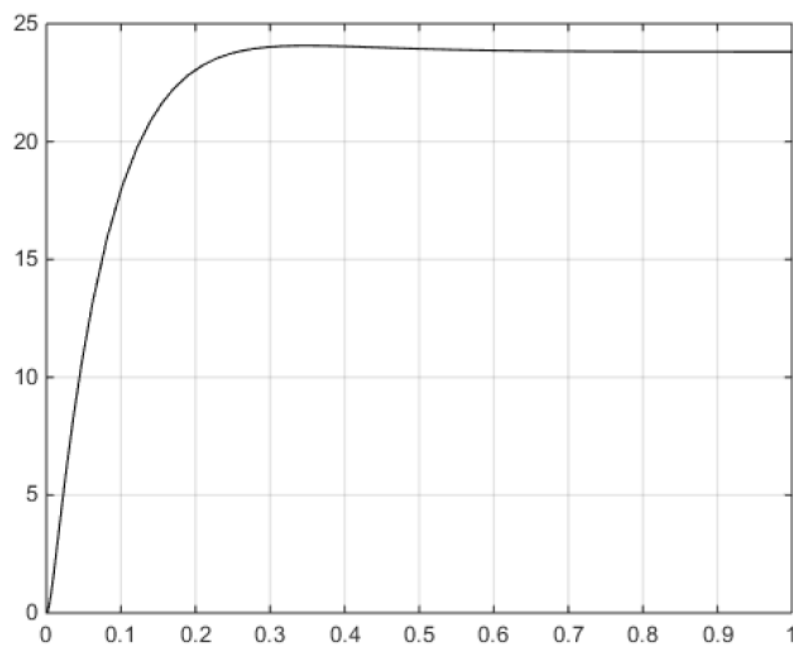


Рисунок 3.18. Графік перехідного процесу за струмом

З графіку видно, що перерегулювання перехідного процесу відсутнє, а час перехідного процесу—0.17, що є задовільним для двигуна із цією вихідною потужністю.

Автоматичне налаштування ПІ-регулятора швидкості зображено на рисунку 3.19:

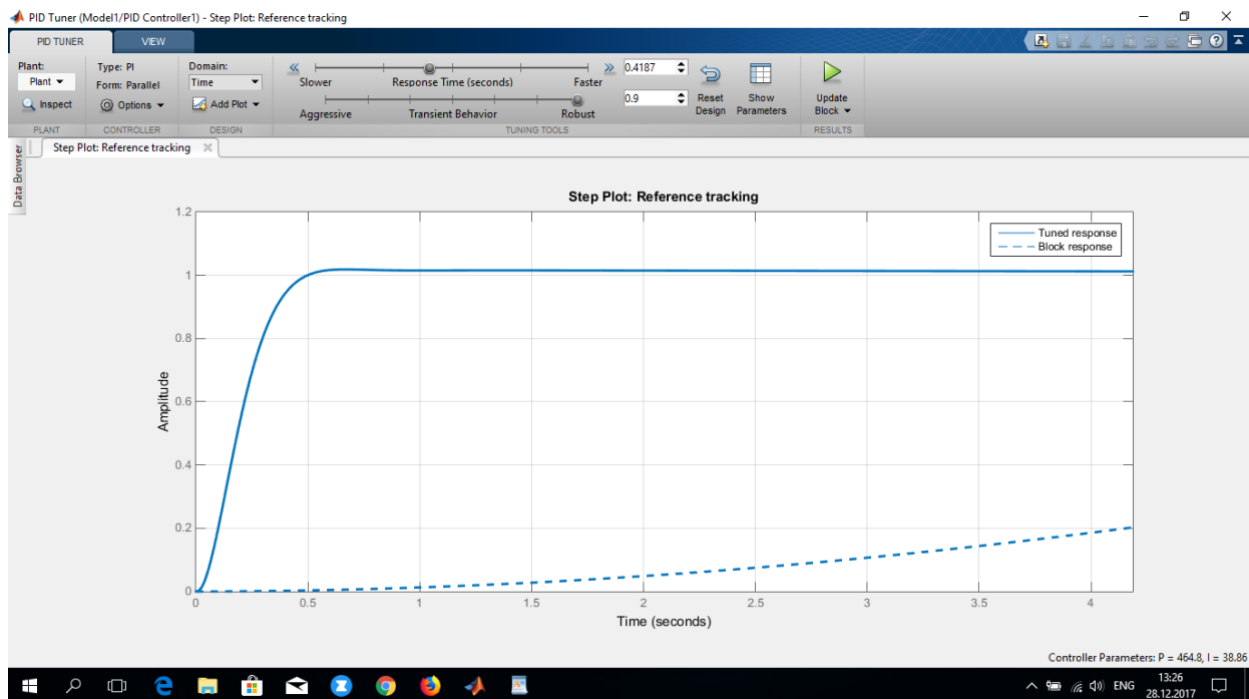


Рисунок 3.19. Налаштування ПІ-регулятор швидкості.

Графік перехідного процесу представлений на рисунку 3.20.

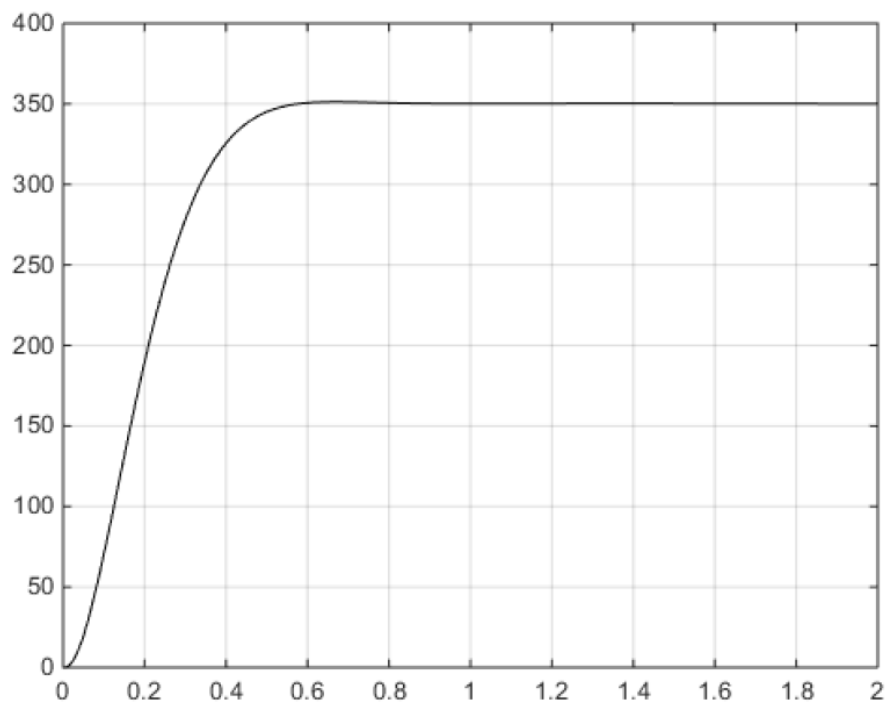


Рисунок 3.20. Графік перехідного процесу за швидкстю.

З графіку видно, що перерегулювання по швидкості відсутнє, а час перехідного процесу складає 0.5. Із цього слідує, що цей перехідний процес є задовільним для двигуна із цією вихідною потужністю.

Налаштування П-регулятора положення зображено на рисунку 3.21:

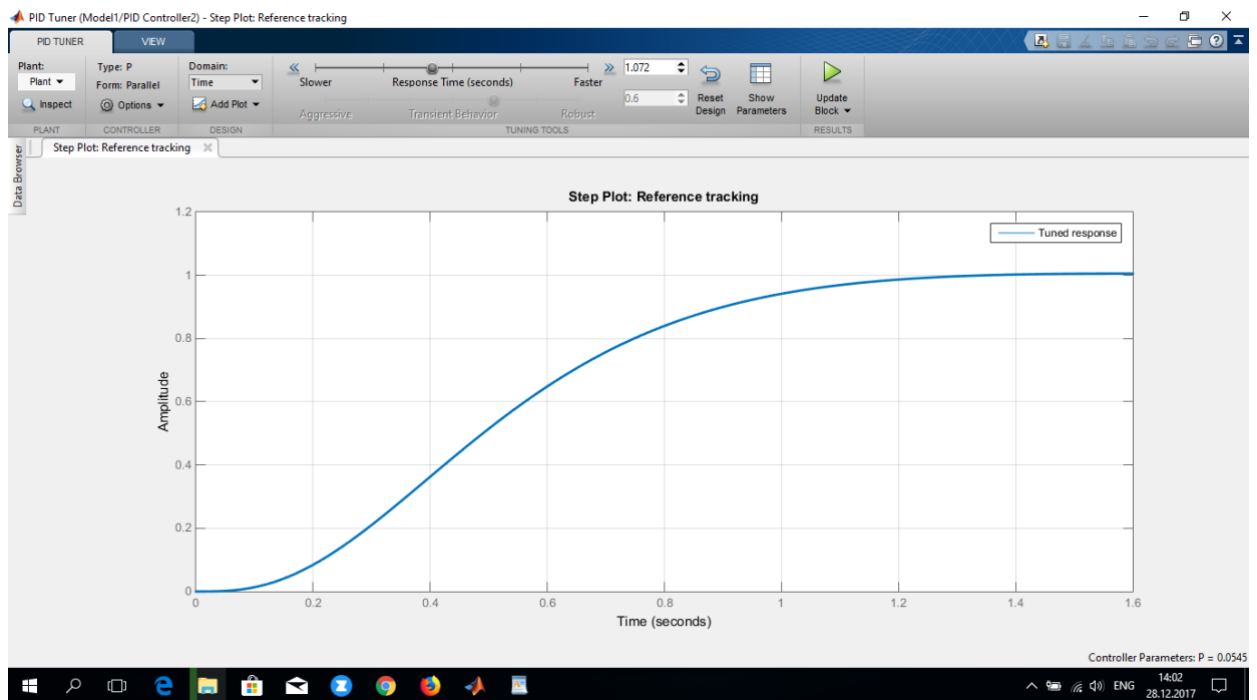


Рисунок 3.21. Налаштування П-регулятора положення.

Графік перехідного процесу представлений на рисунку 3.22.

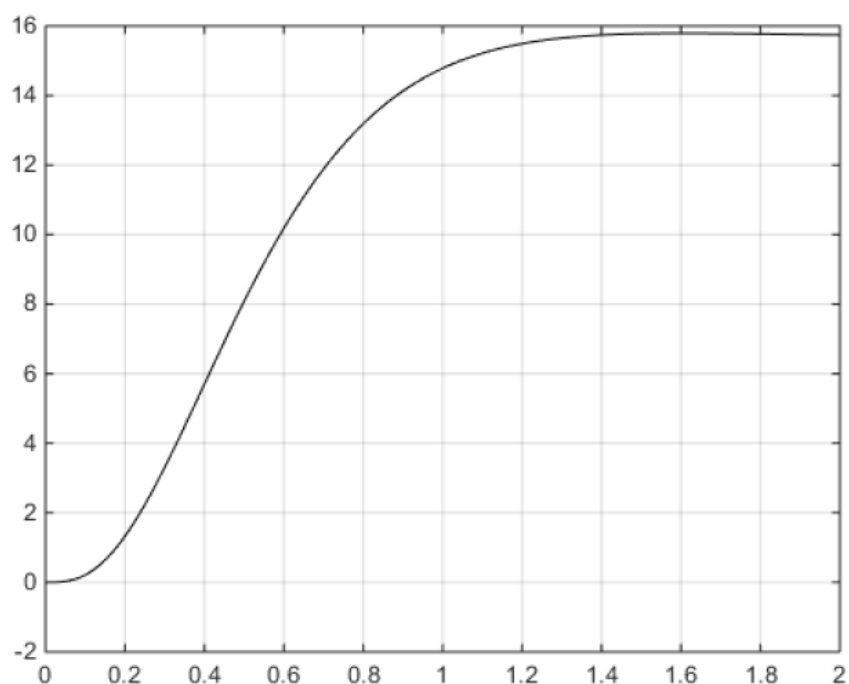


Рисунок 3.22. Графік перехідного процесу за положенням.

З графіку видно, що перерегулювання по положенню відсутнє, а час перехідного процесу складає 1.4 с. Із цього слідує, що цей перехідний процес задовільним для двигуна із цією вихідною потужністю.

При формуванні траєкторії руху графік перехідних процесів положення має вигляд, зображений на рисунку 3.23:

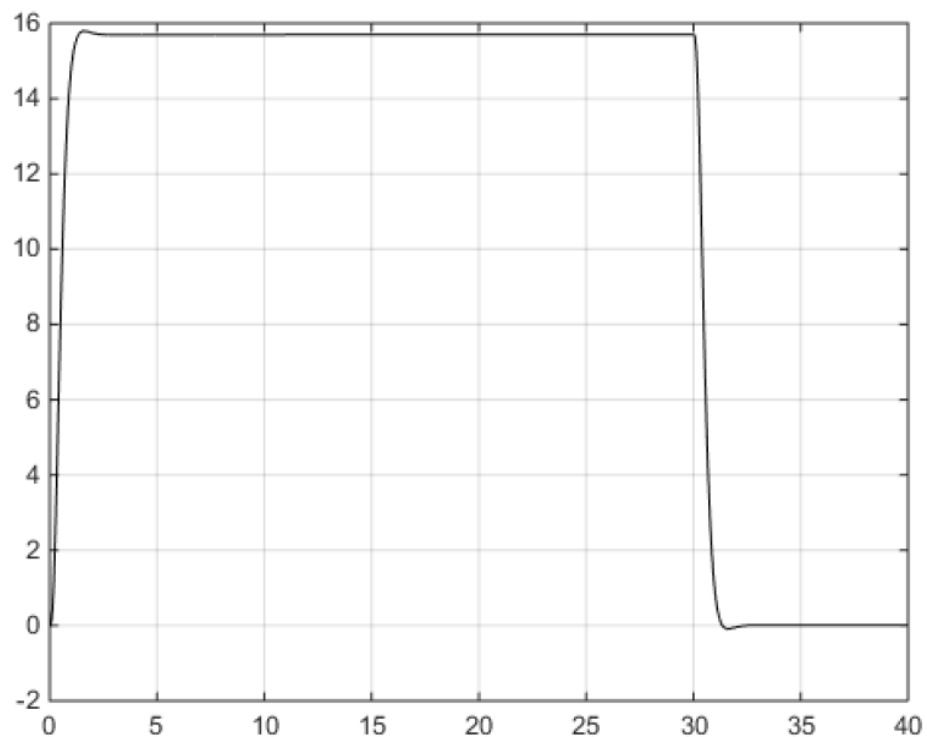


Рисунок 3.23. Графік перехідних процесів положення при формуванні траєкторії руху.

З графіку видно, що із своєю потужністю двигун, при завданні напруги, пропорційної положенню вала двигуна, швидко реагує на цей сигнал та набирає задану швидкість, тобто ці характеристики задовольняють систему автоматизації електроприводу «летючої пили».

3.4. Електропривод за системою СП-СД.

3.4.1. Функціональна схема електроприводу.

Розглянемо систему векторного управління синхронним двигуном з постійними магнітами (СДПМ).

Область застосування таких систем: високоякісний електропривод подач металорізальних станків. Основні характеристики контура регулювання швидкості: діапазон регулювання – не менше 10000, полоса пропускання – не менше 100 Гц.

Функціональна схема системи векторного керування СДПМ зображена на рисунку 3.4.1.

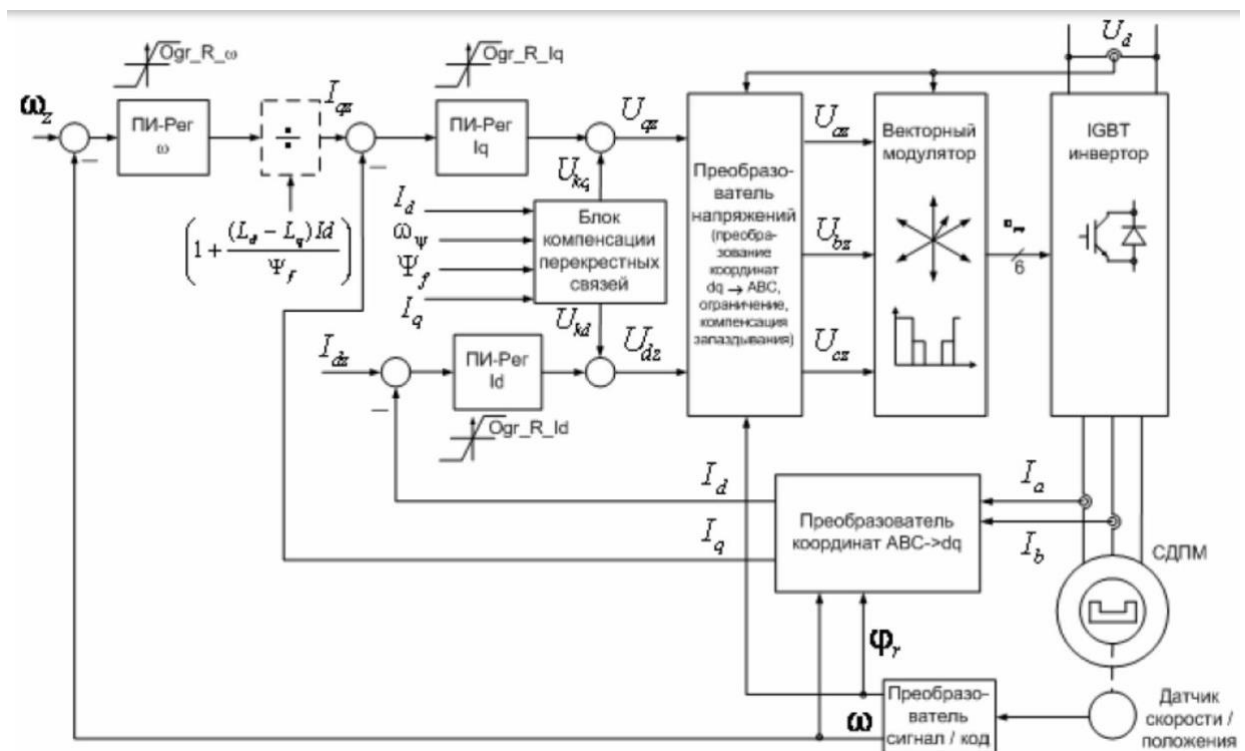


Рисунок 3.4.1. Функціональна схема системи векторного керування СДПМ.

3.4.2. Математична модель електроприводу установки з системою підлеглого регулювання координат.

На рисунку 3.4.2 зображена структурна схема електроприводу за системою СП – СД без блоку завдання.

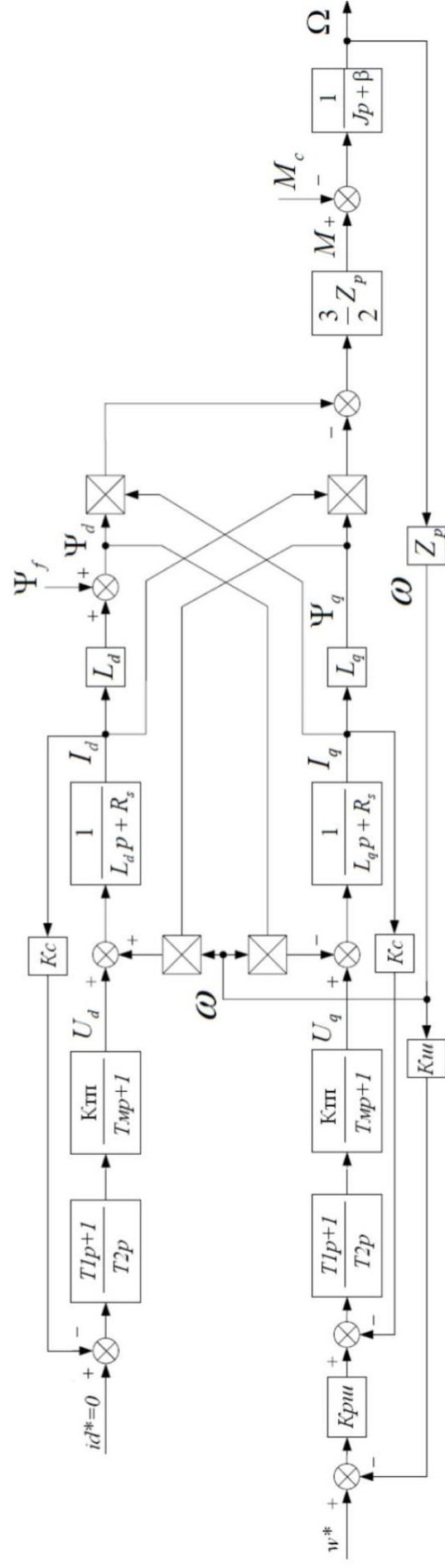


Рисунок Структурна схема електроприводу за системою СП – СД без блоку завдання

3.4.4. Віртуальна модель електроприводу системи СП-СД

На рисунку 3.4.4 зображена віртуальна модель електроприводу системи СП-СД.

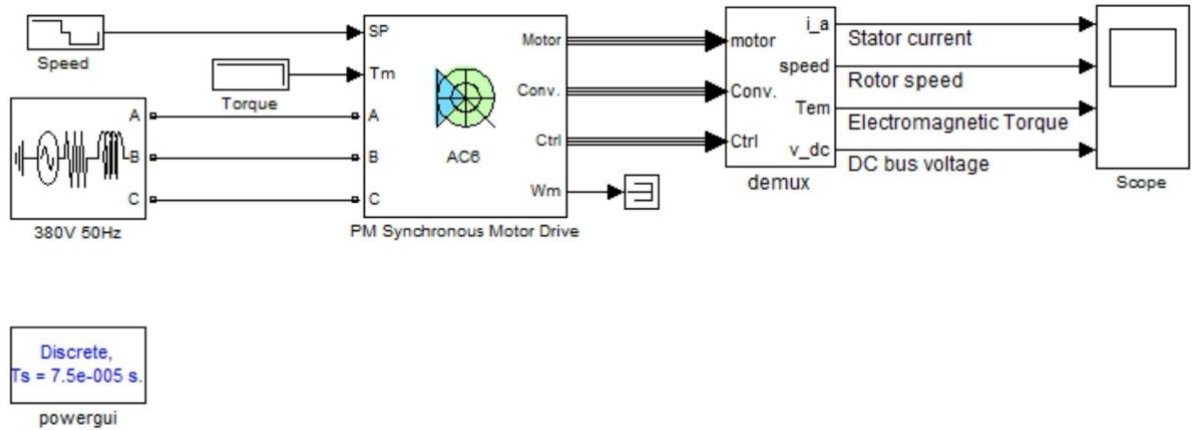


Рисунок 3.4.4. Віртуальна модель електроприводу системи СП-СД.

3.4.5. Дослідження динамічних характеристик системи позиційного електроприводу з синтезованим регулятором і класичними регуляторами положення.

Дослідження динамічних характеристик контуру стабілізації положення з синтезованим регулятором було проведено методом цифрового моделювання за допомогою математичного пакета Matlab і його додатку Simulink. На рис. 3.4.2 зображено структурну схему системи з регулюванням положення та синтезованим оптимальним регулятором, що реалізована в Matlab:

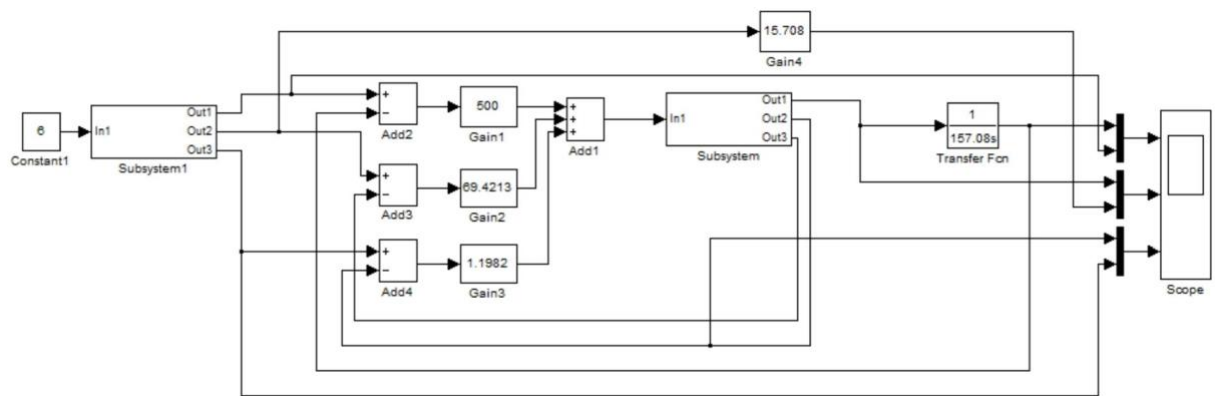


Рисунок 3.4.2 Структурна схема системи з регулюванням положення та синтезованим регулятором

На рис.3.4.3 зображені графіки перехідних процесів в системі за положенням, швидкістю і струмом статора при використанні синтезованого оптимального регулятора.

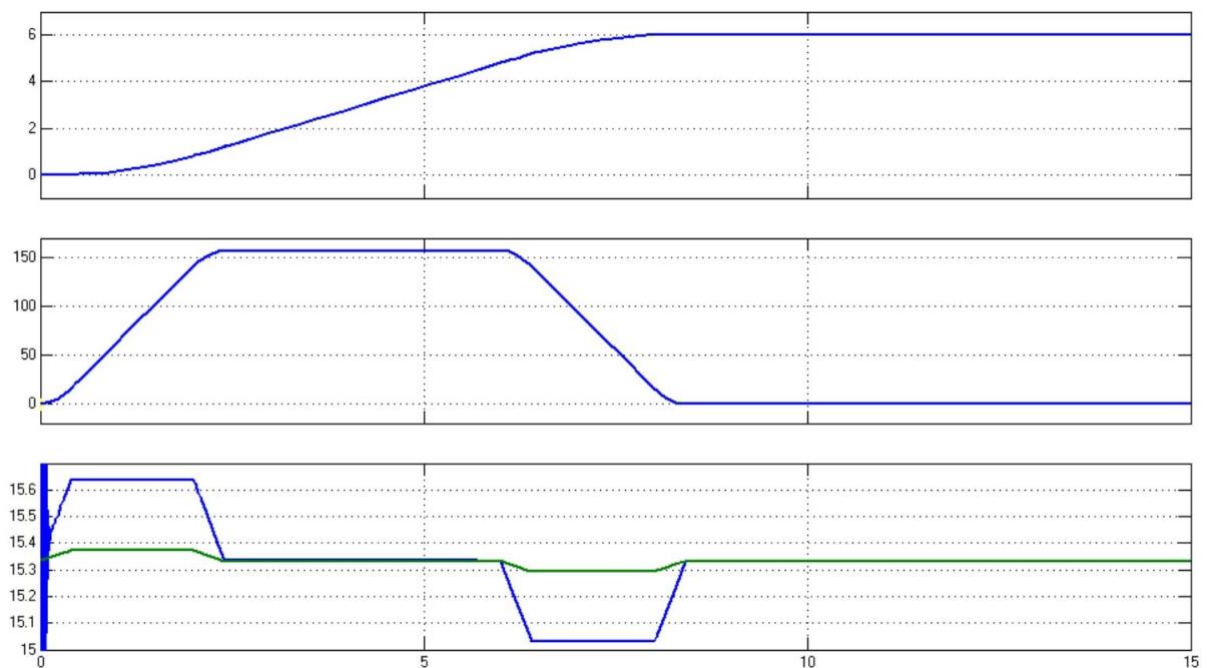


Рисунок 3.4.3. Графіки по положенню, швидкості і струму статора.

Слід відзначити, що якість перехідних процесів за положенням, швидкістю та струмом є досить високою.

Розділ 4. Старт-проект

4.1 Аналіз ринку систем крою прокатного стану.

Розглянемо найбільш важливі конструкції летючих ножиць, класифікованих за технологічним призначенням. Летючі ножиці великосортних і заготівельних станів виконуються з кривошипно-коромисловим механізмом різання. Продуктивність станів збільшують в основному шляхом розширення перетинів заготовок, підвищення швидкостей прокатки і скорочення паузи, а також збільшення розмірів заготовки.

Летючі ножиці для обвідних ліній. Створення потужних ножиць дозволило на якійсь новій основі вирішити проблему різання на обвідних лініях заготівельних станів. Нове планування стану, пов'язане з заміною стаціонарних ножиць, забезпечує безперервний технологічний процес на ділянці різання і дозволяє отримати ряд довжин заготовок в діапазоні $L = 4-12$ м при швидкості руху прокату $V_m = 2,3-2,5$ м / с і роботі ножиць в режимі електричного вирівнювання швидкості (РЕВС).

В даний час на Західно-Сибірському, Магнітогорському і Макіївському металургійних комбінатах, де успішно експлуатуються три різновиди таких ножиць з зусиллям різання 4 МН. Розроблено проект головного зразка ножиць для обвідних ліній з $P = 8$ МН для різання квадратів зі стороною 200 мм з високолегованих сталей. Виготовлення таких ножиць погоджено з провідними заводами важкого машинобудування.

Летючі ножиці заготівельних станів, що встановлюються за чистовою групою клітей, виконуються із зусиллями різання 16-25 МН і забезпечують різання на довжини 4 - 12 м квадратів до 150x 150 мм "на діагональ" при швидкостях руху прокату до 6 м / с. Розроблено дві моделі таких ножиць. Перша модель з $P = 2,5$ МН забезпечує різання зі швидкістю ≤ 4 м / с. Головний зразок кривошипно-коромислових ножиць для заготовки 120x120 мм з високолегованих сталей успішно експлуатується з 1978 р на обтисно-

заготівельному стані 950/850/750 в Румунії. Система автоматизованого електроприводу, виконана ВНП електроприводом повністю на вітчизняному обладнанні, забезпечує відхилення довжини від заданого значення в діапазоні від 6 до 12 м не більше 10-20 мм, а в кожній партії - не більше 5-10 мм. Румунською стороною було проведено зіставлення даних експлуатації аналогічних летючих ножиць, поставлених фірмами ФРН для іншого стану, яке показало, що Російське обладнання не поступається за якісними показниками.

Розроблено проект ножиць для різання заготовки 170x170 мм. Вдосконалений кривошипно-коромисловий механізм різання забезпечує при бічних зазорах 2-3 мм отримання вертикального перекриття 250 мм, необхідного для різання "на діагональ". Відзначимо, що діагональ квадрата 170 мм в 1,21 рази більше, ніж квадрата 140 мм, що розрізається ножицями фірм ФРН (більш складної конструкції) з паралелограмним механізмом різання. Нова конструкція забезпечує в два рази менші кути повороту ножів в зоні різання і збільшення в 1,3 рази їх вертикального перекриття в порівнянні з відомими схемами (при рівних бічних зазорах між ножами).

Друга модель летючих ножиць виконана з $P = 1,6$ МН і забезпечує різання на довжини 4,5-12 м квадратів до 130x130 мм "на діагональ" зі швидкістю 6 м / с. Ножиці призначені для заміни планетарних і кривошипно-ексцентрикових і мають масу механічного обладнання 110 т.

Ефективність запропонованих методів конструювання доведена розробленими моделями, які протягом багатьох років успішно експлуатуються на металургійних заводах країни і за кордоном. В роботі показано, що існуючі конструкції з традиційно застосовуваним ріжучим інструментом (ножами), розробленим за методикою СКМЗ не забезпечують максимально можливого зниження динамічних навантажень в чистових клітках стану при захопленні переднього кінця смуги в зв'язку з незначним виступом шеврони, а також не дозволяють отримувати оптимальну форму

переднього і заднього кінців смуги, що забезпечує максимальне зниження динамічних навантажень. Цей недолік вдалося прибрати завдяки модернізації ножиць, що мають барабани з двома парами ножів, зводиться до заміни верхнього і нижнього барабанів новими, на яких будуть встановлені одна пара ножів для обрізки переднього кінця і друга – для заднього. Зазначені вище проблеми в багатьох випадках можуть бути успішно вирішені в результаті часткової модернізації: заміни механічної частини ножиць, механізму різання, ріжучого інструменту. Але запропоновані методи не є актуальними в даний час. Більш ефективним рішенням може являти собою електромеханічна система порізки прокатного стану летюча пила, електропривод якої працює під управлінням системи мірного різання, забезпечуючи необхідну точність порізки матеріалу. Необхідна точність досягається електромеханічним комплексом, до складу якого входять чотири основних механізми: пересування каретки; обертання пилкового диска; переміщення пилкового диска; зчіпки каретки, яка рухається, з трубою. Останні три механізми встановлені на каретці.

Сучасний регульований електропривод змінного струму каретки виконується за системою ПЧ-АД або ПЧ-СД. З огляду на вимоги до динаміки цього електроприводу доцільно застосувати електродвигун з високими динамічними показниками.

4.2. Аналіз та порівняння електроприводів змінного струму, які виконані за системами ПЧ-АД і ПЧ-СД

Вихідні дані для проведення аналізу – технічні характеристики двигуна показані на таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики двигуна електроприводу
каретки

Максимальна потужність, P_{\max}	2,99 кВт
Крутний момент, M_n	150 Нм
Момент інерції, J_L	3,2 кгм ²
Швидкість обертання валу, n	119,37 1/хв

4.3. Проектування електроприводу для механізму лінійного переміщення

Для проектування електроприводу каретки летючої пили використовується онлайн ресурс Drive Solution Designer EASYExplorer від компанії Lenze, який можна знайти за посиланням <http://dsc.lenze.de/dsc/>. При цьому відкриється наступне вікно (рис.1.1) для інтерфейсу програми Drive Solution Designer.

Рисунок 1.1 – Інтерфейс програми Drive Solution Designer.

У цьому вікні з'являється можливість ввести потрібні дані для вибору окремих елементів електроприводу.

Наступний слайд (рис 1.2) показує вибір способу руху механізму та спосіб керування ним. Тут, за допомогою кнопок,обирається “travelling/conveying” - горизонтальне переміщення, так як каретка рухається в горизонтальному положенні, та “Drive with servo inverter” – сервопривод.

The screenshot shows the Lenze application configuration interface. It is divided into three main sections:

- Select application:** Three buttons are shown: "Travelling/conveying" (selected, with a double-headed arrow icon), "Lifting" (with an up/down arrow icon), and "Rotating" (with a circular arrow icon).
- Select drive concept:** Four buttons are shown: "Motor direct on line", "Drive with decentralised frequency inverter", "Drive with frequency inverter", and "Drive with servo inverter" (selected, with a servo motor icon).
- Application data:** A table of input parameters is shown:

Parameter	Value	Unit
Operating mode	OM	S1
Operating time	OT	100 %
Speed	v	1 m/s
Acceleration time	t	10 s
Diameter	d	250 mm
Mass	m	500 kg

On the right side, under "Determined requirements", the following values are calculated:

Parameter	Value
Performance P_{std}	0.04 kW
Performance P_{max}	0.09 kW
Torque M_{std}	4.91 Nm
Torque M_{max}	11.16 Nm
Moment of inertia J_L	7.81 kgm ²
Speed n	76.39 1/min

Рисунок 1.2 – Вибір способу руху механізму та вибір концепції електроприводу.

Далі здійснюється введення параметрів електродвигуна та механізму (рис.1.3).

The screenshot shows the Lenze application configuration interface with the "Application data" section expanded. The input parameters are:

Parameter	Value	Unit
Operating mode	OM	S1
Operating time	OT	100 %
Speed	v	1 m/s
Acceleration time	t	0.2 s
Diameter	d	160 mm
Mass	m	500 kg
Sliding friction μ	0.1	

The "Additional ratio" is set to 1.0. On the right side, under "Determined requirements", the following values are calculated:

Parameter	Value
Performance P_{std}	0.49 kW
Performance P_{max}	2.99 kW
Torque M_{std}	39.24 Nm
Torque M_{max}	239.24 Nm
Moment of inertia J_L	3.2 kgm ²
Speed n	119.37 1/min

Рисунок 1.3 – Параметри електродвигуна та механізму.

Зі слайду видно задані параметри, такі як:

- “Speed” – швидкість $v = 1 \text{ м/с}$;
- “Acceleration time” – час розгону $t = 0,2 \text{ с}$;
- “Diameter” – діаметр шківу ременної передачі $d = 160 \text{ мм}$;
- “Mass” – маса $m = 500 \text{ кг}$

При виборі з двох варіантів “Sliding friction” – тертя ковзання, чи “Rolling friction” – тертя кочення (рис.1.4), задається спосіб руху механізму (у першому випадку – ременний привод, у другому –привод ходової частини). У нашому випадку каретка рухається через ремінь.

Speed	v	1	m/s
Acceleration time	t	0.2	s
Diameter	d	160	mm
Mass	m	500	kg
Friction type		0.1	

Friction type options: Sliding friction, Rolling friction

Рисунок 1.4 – вибір коефіцієнту тертя.

- “Sliding friction” – тертя ковзання $\mu = 0,1$.

Також, на рисунку 1.4 можна побачити, що програма DSD визначила вимоги до приводу (Determined requirements)

- “Performance” – продуктивність, де вказано $P_{sds} = 0,49 \text{ кВт}$ та $P_{max} = 2,99 \text{ кВт}$;
- “Torque” – крутний момент – $M_{sds} = 0,49 \text{ Нм}$ та $M_{max} = 2,99 \text{ Нм}$;
- “Moment of inertia” – момент інерції $J_L = 3,2 \text{ кгм}^2$
- “Speed” – швидкість обертання $n = 119,37 \text{ 1/хв.}$

На наступному слайді (рис.1.5) йде вибір основних елементів електроприводу:

- Інвертор серії 8400 frequency inverter;
- Мотор серії MD (IE1);
- Редуктор серії g500-H helical gearboxes.

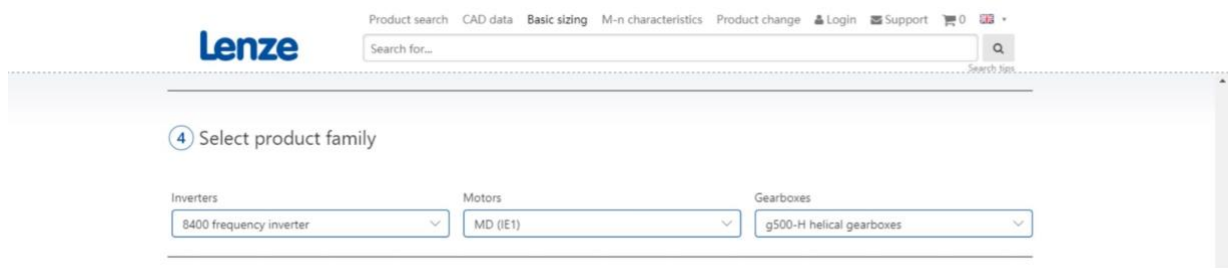


Рисунок 1.5 – Вибір основних елементів електроприводу (двигун серії MD (IE1)).

У цьому випадку був виконаний вибір трифазного асинхронного двигуна.

В іншому випадку вибирається синхронний двигун серії MCS (рис.1.6).

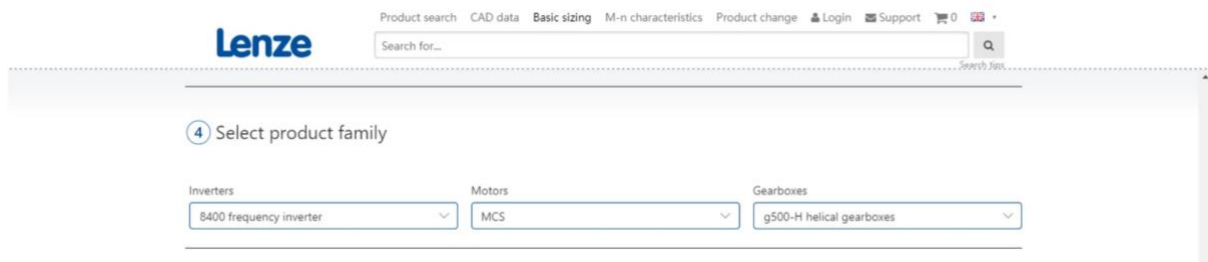


Рисунок 1.6 – Вибір основних елементів електроприводу (двигун серії MCS).

Наступний слайд показує приводне рішення програми з обраним асинхронним двигуном (рис.1.7).

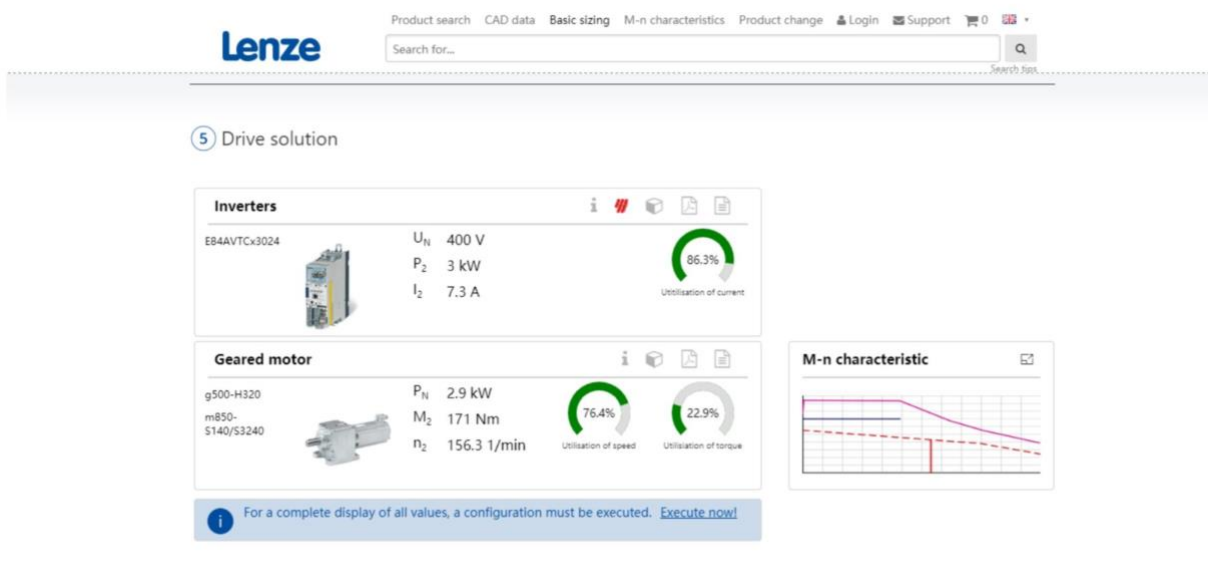


Рисунок 1.7 – Приводне рішення з обраним двигуном серії MD (IE1).

Було виведено:

- Інвертор – E84AVTCx3024, у якого $P_2 = 3$ кВт і $I_2 = 7,3$ А, а використання самого струму складає 86,3%.

- Мотор-редуктор – g500-H320 (редуктор) і m850-S140/S3240 (двигун) – $P_n = 2,9$ кВт, $M_2 = 171$ Нм, $n = 156,3$ 1/хв;

Використання швидкості – 76,4%, використання моменту – 22,9%.

Наступний слайд показує приводне рішення програми з обраним синхронним двигуном (рис.1.8).

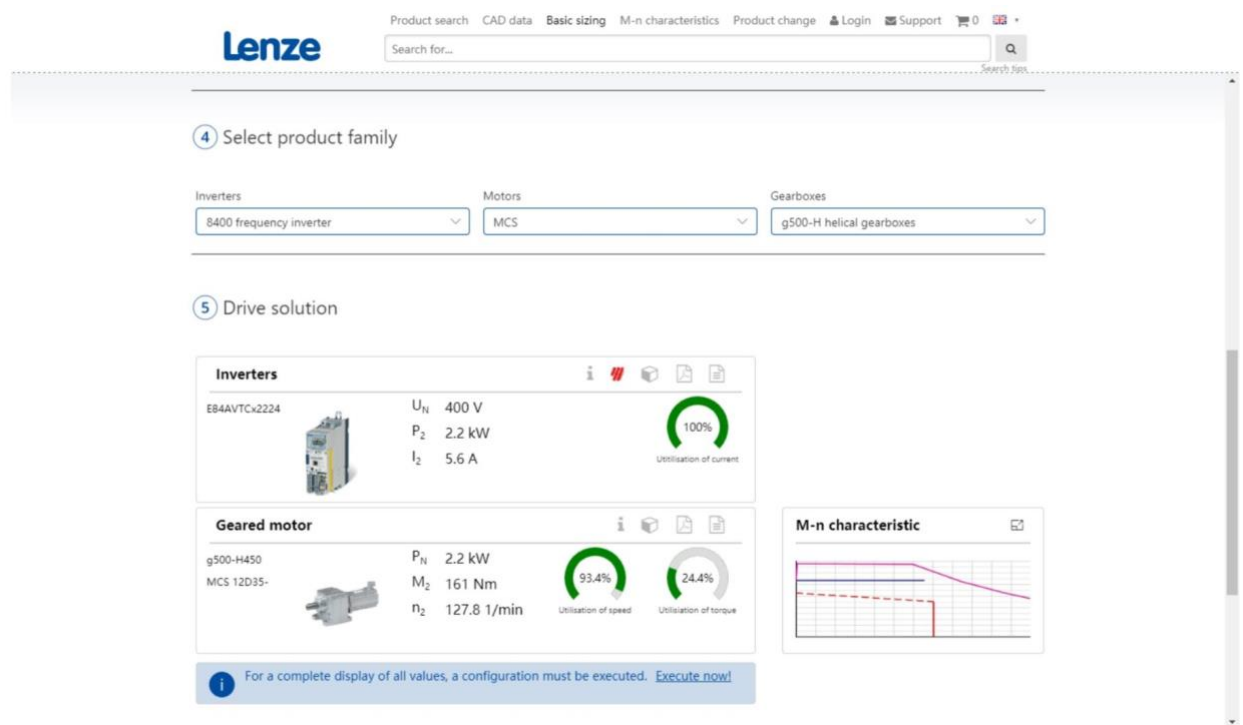


Рисунок 3.8 – Приводне рішення з обраним двигуном серії MCS.

Було виведено:

- Інвертор – E84AVTCx2224, у якого $P_2 = 2,2$ кВт і $I_2 = 5,6$ А, а використання самого струму складає 100%.

- Мотор-редуктор – g500-H450 (редуктор) і MCS 12D35(двигун) – $P_n = 2,2$ кВт, $M_2 = 161$ Нм, $n = 127,8$ 1/хв.;

Використання швидкості – 93,4%, використання моменту – 24,4%.

4.4.

4.4. Аналіз та порівняння електроприводів каретки, які виконані за системами ПЧ-АД і ПЧ-СД.

Як видно з результатів приводного рішення програми Drive Solution Designer, електропривод, виконаний за системою ПЧ -АД із обраним трифазним асинхронним двигуном серії MD (IE1) має характеристики гірші, ніж у привода, виконаного за системою ПЧ-СД із обраним синхронним двигуном серії MCS – вихідний струм інвертора у ПЧ-АД – $I_2 = 7,3$, використовується тільки 86,3%, коли у ПЧ-СД – $I_2 = 5,6$, а використовуються всі 100%. Також у першому випадку (АД) потужність двигуна ($P_n = 2,9$ кВт) та інвертора ($P_2 = 3$ кВт) більша, ніж у другому (СД) – $P_n = 2,2$ кВт, $P_2 = 2$ кВт, на що потребується більше затрат електроенергії. Асинхронний мотор-редуктор має такі вихідні дані: $M_2 = 171$ Нм, $n = 156,3$ 1/хв., використання швидкості – 76,4%, використання моменту – 22,9%.

Синхронний: $M_2 = 161$ Нм, $n = 127,8$ 1/хв.; Використання швидкості – 93,4%, використання моменту – 24,4%. З цього випливає, що у СД продуктивність краща, ніж у АД. Тому вибираємо електропривод, виконаний за системою ПЧ-СД.

Для порівняння систем використовується більш детальні та наглядні дані, які описані на наступних слайдах.

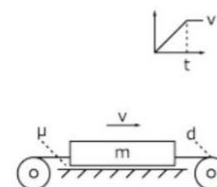


Basic sizing

EASY Product Finder 4.7.1_2019-06-19

Application data


Application: Travelling/conveying		
Operating mode	OM	S1
Operating time	OT	100 %
Speed	v	1 m/s
Acceleration time	t	0,2 s
Diameter	d	160 mm
Mass	m	500 kg
Sliding friction	μ	0.1

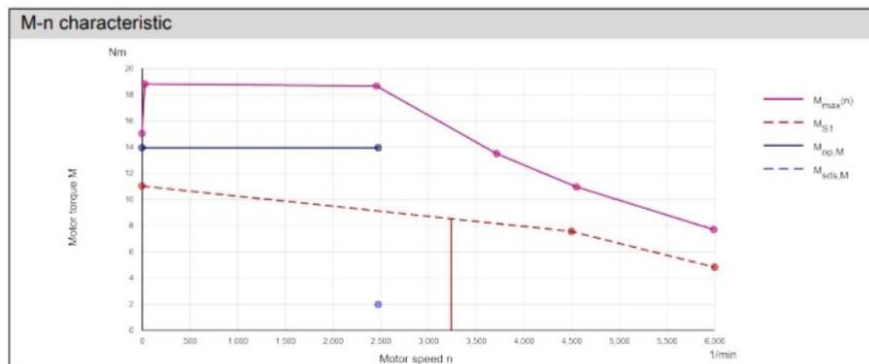


Determined requirements			
Performance	P_{sds}	0.49 kW	
	P_{max}	2.99 kW	
Torque	M_{sds}	39.24 Nm	
	M_{max}	239.24 Nm	
Moment of inertia	J_L	3.2 kgm ²	
Speed	n	119.37 1/min	

Drive solution: Drive with servo inverter

Inverters			
E84AVTCx3024		U_N	400 V
		P_2	3 kW
		I_2	7.3 A
		86.3% Utilisation of current	

Geared motor				
g500-H320 m850-S140/S3240		P_N	2.9 kW	
		M_2	171 Nm	
		n_2	156.3 1/min	
		76.4% Utilisation of speed		
		22.9% Utilisation of torque		



Note: The calculation results presented in this summary report are based on the default settings you have made and the data you have entered. Please check that this data is correct and complete. We cannot accept liability for any defective, unusable or incomplete drive solutions based on inaccurate or incomplete data. Please also note that this summary report does not cover all the issues that are relevant to sizing. In order to realise a complete drive sizing, please use the Drive Solution Designer (DSD) which can be downloaded from the Internet or get in touch with the Lenze sales department.

19.06.2019 17:40

Система з Асинхронним двигуном



Basic sizing

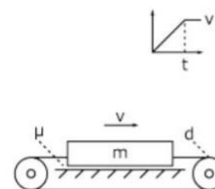
EASY Product Finder 4.7.1_2019-06-19

Lenze

Page 1 from 1


Application data


Application: Travelling/conveying		
Operating mode	OM	S1
Operating time	OT	100 %
Speed	v	1 m/s
Acceleration time	t	0.2 s
Diameter	d	160 mm
Mass	m	500 kg
Sliding friction	μ	0.1

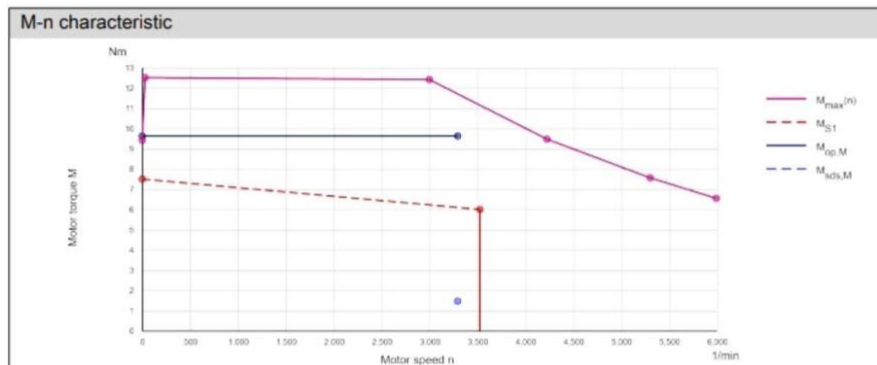


Determined requirements	
Performance	P_{sds} 0.49 kW P_{max} 2.99 kW
Torque	M_{sds} 39.24 Nm M_{max} 239.24 Nm
Moment of inertia	J_L 3.2 kgm ²
Speed	n 119.37 1/min

Drive solution: Drive with servo inverter

Inverters	
E84AVTCx2224	 U_N 400 V P_2 2.2 kW I_2 5.6 A
Utilisation of current 100%	

Geared motor	
g500-H450 MCS 12D35-	 P_N 2.2 kW M_2 161 Nm n_2 127.8 1/min
Utilisation of speed 93.4%	Utilisation of torque 24.4%



Note: The calculation results presented in this summary report are based on the default settings you have made and the data you have entered. Please check that this data is correct and complete. We cannot accept liability for any defective, unusable or incomplete drive solutions based on inaccurate or incomplete data. Please also note that this summary report does not cover all the issues that are relevant to sizing. In order to realise a complete drive sizing, please use the Drive Solution Designer (DSD) which can be downloaded from the Internet or get in touch with the Lenze sales department.

19.06.2019 17:22

Система із синхронним двигуном

4.5. Висновки по старту.

В даній роботі було проведено аналітичний огляд існуючих систем розкрою прокатного стану. Із запропонованих методів, з огляду на вимоги до високої динаміки та інших показників швидкості, точності та якості процесу, найбільш ефективним являє собою електромеханічна система летюча пила. Проведено аналіз порівняння систем електропривода каретки летючої пили. Виявлено, що привод, виконаний за системою ПЧ-СД, має вищі динамічні показники та продуктивність, а також нижчі потреби потужності електричної енергії, ніж виконання за системою ПЧ-АД.

Тому, дивлячись на те, що ціна синхронного електроприводу значно вища за ціну асинхронного, якісні показники, в цей час, також значно перемагають.

Висновки

1. Виконавши аналітичний огляд сучасних алгоритмів керування електроприводами систем крою прокатного стану слід зазначити, що система є складною з точки зору теорії автоматичного керування. Система призначена для циклічного рішення двох основних задач: управління параметрами електродвигуна каретки (струм, момент, швидкість обертання) і управління траєкторій руху каретки, як робочого органу. Якщо перша з цих завдань може бути успішно вирішена за допомогою стандартних засобів управління сучасного автоматизованого електроприводу з цифровим мікропроцесорним управлінням, то для якісного вирішення другого завдання потрібне використання допоміжних засобів програмованої обчислювальної техніки.

2. Складність системи, що розглядається обумовлена наявністю нелінійностей у контурі регулювання положенням. При аналізі контуру положення можна визначити, що на динаміку відпрацювання переміщення приводом пили впливає люфт виконавчого механізму, особливо під час повертання пили у вихідне положення, на обмеження на швидкість, що має місце оскільки двигун працює на максимальних обертах.

3. В цій роботі було отримано квазіоптимальний регулятор переміщення за допомогою використання процедури аналітичного конструювання із застосування концепції методу Пірсона. Завдяки цьому методу в кожен момент часу вирішується задача аналітичного конструювання оптимального регулятора для лінійної моделі і квадратичного функціоналу якості.

4. Проаналізувавши графіки перехідних процесів, можна зробити висновок про те, що система досить швидко компенсує зміну сигналів від значення люфту. Це значить, що квазіоптимальний регулятор має малу динамічну та статичну похибку в порівнянні з класичним ПІД-регулятором та лінійно-квадратичним регулятором.

Літературні джерела.

1. Servo drives and servo motors for machines from 0.4 to 6 kW. Режим доступу: <https://www.se.com/ww/en/product-range-download/1162-lexium-05-%26-motors/> Дата доступу: 25.04.2020р.

2. Servo Drives 9400 HighLine. Reference manual. Режим доступу: [http://download.lenze.com/TD/E94AxHE__Servo%20Drives%209400%20HighLine%20\(from%20Firmware%2001-50\)__v15-0__EN.pdf](http://download.lenze.com/TD/E94AxHE__Servo%20Drives%209400%20HighLine%20(from%20Firmware%2001-50)__v15-0__EN.pdf) Дата доступу: 25.04.2020р.

3. Sigma-7 Servo Products Режим доступу: <https://www.yaskawa.com/products/motion/sigma-7-servo-products> Дата доступу: 25.04.2020р.

4. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К. Компенсация естественных нелинейностей по автоматике. М., Энергоатомиздат, 1982г. – 96с.

5. Торопов А. В. Оптимальное управление электродвигателем роторного колеса на базе ПЛК с применением концепции метода Пирсона / А. В. Торопов, Л. В. Торопова //Вісник НТУУ «КПІ». Гірництво : збірник наукових праць. – 2014. – Вип. 25. – С. 144–149.

6. Торопов А. В. Синтез квазиоптимального регулятора загрузки конвейера горнодобывающего предприятия с использованием концепции метода Пирсона/ А. В. Торопов, Л. В. Торопова // Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки". – 2018. – Вип. 1(81). – С. 287–292.

7. Система управления Летучей пилой. Режим доступа: <https://chastotnik.com.ua/s-sistema-upravleniya-letuchey-piloy>//Дата доступа: 2015-12-25.

8. Каледина О.С., Лимарев А.С. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСКРОЯ ПРОКАТА НА СОРТОВЫХ СТАНАХ, Калибровочное бюро (www.passdesign.ru). 2013. Выпуск 2. — с.47.

9. Сумский С.Н. Металлосберегающие технологии раскроя проката, АХК "ВНИИметмаш" "Сталь". №6.2003г.

10. Кузьменко А. Г. Мелкосортные станы. Состояние, проблемы, перспективы. - М.: Металлургия, 1996.

11. Сумский С. Н., Дунаевский В. И., Шагас Л. Я. и др. Пути повышения производительности режущего оборудования прокатных станов: Обзор, информ. Сер. 1. Металлургическое оборудование. - М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1985. Вып. 7. 1-85-27.-44с.

12. Сумский С. Н. Система автоматизированного проектирования кривошипно-рычажных машин для резки движущегося проката // Вестник машиностроения. 1986. № 7. С. 53 - 58.

13. Сумский С. Н. Машины для резки движущегося проката и опыт их освоения // Вестник машиностроения. 1984. №4. С. 51 - 56.

14. Сумский С. Н. Новые конструкции летучих ножниц прокатных агрегатов // Вестник машиностроения. 1996. №11. С. 18 - 23.

Робота виконана під керівництвом доц.. к.т.н. Торопова А.В.